

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
RICHARD GAGNÉ, ING.

OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES
MANUFACTURIERS CELLULAIRES

MONTREAL, LE 3 OCTOBRE 2002

© droits réservés de Richard Gagné

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

**M. Ali Gharbi, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure**

**M. Claude Olivier, codirecteur
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure**

**M. Jean-Pierre Kenne, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

**M. Michel Rioux, professeur
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure**

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 1 OCTOBRE 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente un outil d'aide à la décision pour la conception de systèmes manufacturiers cellulaires (SMC). L'outil se compose en trois phases. Pour la première phase, une heuristique de formation de cellules est démontrée selon sa particularité à pouvoir générer des scénarios de SMC reposant sur trois types de stratégies de configuration. La deuxième phase propose l'utilisation de la simulation pour combler le manque d'informations nécessaires à la conception que l'heuristique seule ne peut fournir. Pour cela, un modèle général de simulation spécialement conçu pour simuler différents scénarios est exposé et illustré. La dernière phase de l'outil présente une structure hiérarchique des critères quantitatifs et qualitatifs traités par la méthodologie du procédé d'analyse hiérarchique (AHP) qui permet au décideur, à l'aide d'une synthèse de pondération des critères, de choisir le meilleur des scénarios de système manufacturier générés dans les deux premières phases de la méthode de conception.

OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES MANUFACTURIERS CELLULAIRES

Richard Gagné, ing.

SOMMAIRE

Nous présentons dans ce mémoire un outil d'aide à la décision pour la conception de systèmes manufacturiers cellulaires (SMC). L'outil se compose en trois phases pour lesquelles trois méthodologies différentes sont employées. Pour la première phase, une heuristique de formation de cellules est démontrée selon sa particularité à pouvoir générer des scénarios de SMC reposant sur trois types de stratégies de configuration. La deuxième phase propose l'utilisation de la simulation pour combler le manque d'informations nécessaires à la conception que l'heuristique seule ne peut fournir. Pour cela, un modèle général de simulation spécialement conçu pour simuler différents scénarios de SMC est exposé et illustré. La simulation permet alors de faire vivre ces scénarios sous plusieurs conditions de vie et règles d'ordonnancement et d'extraire des mesures de performance du système de production. La dernière phase de l'outil présente une structure hiérarchique des critères quantitatifs et qualitatifs traités par la méthodologie du procédé d'analyse hiérarchique (AHP) qui permet au décideur, à l'aide d'une synthèse de pondération des critères, de choisir le meilleur des scénarios de système manufacturier générés dans les deux premières phases de la méthode de conception. Un exemple d'un cas industriel est traité afin de valider la méthodologie de conception proposée.

A DECISION MAKING TOOL FOR NEW CELLULAR MANUFACTURING SYSTEMS DESIGN IN A MULTI-CRITERIA ENVIRONMENT.

Richard Gagné, ing.

ABSTRACT

This thesis presents a three-phase approach to design cellular manufacturing systems (CMS) in a multi-criteria environment. This work presents the axioms of a complete software for the design of CMS. The first phase of the approach includes a heuristic tool to solve a cell formation problem. This tool allows the designer to create basic scenarios of configuration that will be simulated with a general simulation model during the second phase of the approach. This model takes into account many stochastic events such as machine failures, quality control, bottleneck effects and more. Moreover, it has the ability to offer routing alternatives in case there is lacking capacity of production. With this model the designer has the advantage to extract the measures of performance of the whole system in a dynamic mode. The third phase of the approach uses the multi-criteria methodology of analytic hierarchic process (AHP) where the various decision criteria are gathered to make a synthesis of the problem and to make the right choice of CMS. To validate the effectiveness of this approach, we will present and analyse an industrial case.

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier mes directeurs de recherche Ali Gharbi, ing. Ph.D et Claude Olivier, ing. Ph.D pour leur soutien, leur disponibilité et leurs précieux conseils dans la présente recherche. Le laboratoire LCCSP mis sur pied par eux fut un lieu très utile et favorable à la recherche et l'achèvement des présents travaux. Je tiens à remercier le fond de développement de l'École de Technologies Supérieures pour leur encouragement et leur aide financière. De plus, je salue tous mes bons collègues du laboratoire qui ont su m'encourager et partager leurs précieuses informations quand le besoin urgent se présentait.

Ce mémoire n'aurait été possible sans le précieux soutien et l'encouragement de ma conjointe Pamela. Enfin, je salue particulièrement mes parents qui ont su me transmettre cette force de persévérer et d'entreprendre qui m'accompagne, à chaque fois, dans tout projet que je réalise.

TABLES DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENT	iii
TABLES DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE	8
1.1 Introduction	8
1.2 La technologie de groupe	8
1.3 Outils de formation de cellules	16
1.3.1 Heuristiques de formation de cellules	16
1.3.2 Algorithme génétique.....	19
1.3.3 Système expert	20
1.4 Modélisation et simulation.....	21
1.5 Analyse multicritère	23
CHAPITRE 2 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	26
2.1 Introduction	26
2.2 Heuristique de formation de cellules.....	27
2.2.1. Mécanisme de l'heuristique	27
2.2.2 Données d'entrée de l'heuristique.....	32
2.2.3 Stratégie de création de scénarios	34
2.3 Technique de modélisation	37
2.4 Technique de simulation	41
2.5 Technique d'analyse multicritère.....	43
2.6 Conclusion	45
CHAPITRE 3 : MODÉLISATION ET SIMULATION	47
3.1 Introduction	47
3.2 Description du cas général de modélisation d'un SMC.....	47
3.2.1 Formulation du problème.....	48
3.2.2 Spécification du système manufacturier	48

3.3	Description du modèle	52
3.3.1	Initialisation	55
3.3.2	Lecture des fichiers de données	55
3.3.3	Génération des pannes.....	57
3.3.4	Génération de la demande.....	59
3.3.5	Le réseau principal	60
3.3.6	Les sous-réseaux	61
3.3.7	Collectes des données et fin de la simulation.....	63
3.3.8	Sous-routines de décision.....	64
3.4	Conclusion	66
CHAPITRE 4 : ANALYSE MULTICRITÈRE		67
4.1	Introduction.....	67
4.2	Les critères de décision	67
4.2.1	Critère « Investissement » (C1).....	69
4.2.2	Critère « Performance » (C2).....	71
4.2.3	Critère « Aspect opérationnel » (C3)	72
4.2.4	Critère « Aspect faisabilité » (C4)	74
4.3	Approche de pondération	75
4.3.1	Stratégie de pondération entre les critères	76
4.3.2	Pondération des alternatives par critère	76
4.4	Synthèse des pondérations	78
4.5	Analyse de sensibilité et prise de décision.....	79
4.6	Conclusion	81
CHAPITRE 5 : APPLICATION ET ANALYSE		82
5.1	Introduction.....	82
5.2	Description du cas exemplaire	82
5.3	Génération des scénarios.....	85
5.3.1	Stratégie, phase Heuristique.....	87
5.3.2	Stratégie, phase Simulation.....	89
5.4	Phase 1, Heuristique.....	90
5.5	Phase 2, Simulation.....	106
5.5.1	Expérimentation	106
5.5.2	Validité du modèle de simulation	113
5.6	Phase 3, Analyse Multicritère	117
5.6.1	Pondération des critères et des alternatives.....	118
5.6.2	Analyse de sensibilité et proposition de système.....	122
5.7	Conclusion	126
CONCLUSION		127
ANNEXES:		
1 :	Fichiers de contrôle et de sous-routines en C	130

2 :	Description du modèle générale de simulation de SMC.....	142
3 :	Exemple de fichier de résultats de l'heuristique	162
4 :	Fichier de résultats de la simulation, phase II	167

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Paramètres de conception en fonction du type de configuration34
Tableau II	Liste des paramètres de conception et leurs effets dans l'heuristique ..35
Tableau III	Liste des informations de la simulation52
Tableau IV	Liste des variables et indices du modèle de simulation56
Tableau V	Comparaison des sous-critères du critère «Investissement»78
Tableau VI	Échelle aléatoire de Saaty79
Tableau VII	Base de données des machines, programme de l'heuristique83
Tableau VIII	Base de données des pièces, programme de l'heuristique84
Tableau IX	Base de données des opérations, programme de l'heuristique.....85
Tableau X	Paramètres de conception pour le cas d'application, phase I.....89
Tableau XI	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #193
Tableau XII	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #296
Tableau XIII	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #398
Tableau XIV	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #499
Tableau XV	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #5100
Tableau XVI	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scén. #6101
Tableau XVII	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scén. #7104
Tableau XVIII	Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #8105
Tableau XIX	Équivalence du numéro de chaque machine par cellule107
Tableau XX	Résultats de la phase de simulation112
Tableau XXI	Comparaison de la demande prévue et la demande simulée.....114
Tableau XXII	Comparaison du taux d'occupation des machines estimé et simulée .115

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Recherche de solution optimale	3
Figure 2 Procédure globale de conception d'un SMC.....	6
Figure 3 Matrice initiale d'incidence produits-machines	10
Figure 4 Matrice finale d'incidence produits-machines	10
Figure 5 Système expert KBGT pour la formation de cellules	21
Figure 6 Modèle général d'outil d'aide à la décision pour la conception de SMC..	27
Figure 7 Logigramme abrégé de l'heuristique de formation de cellules.....	29
Figure 8 Structure de modélisation avec les paramètres et variables	39
Figure 9 Nœud de sous-réseau appelant des variables	39
Figure 10 Hiérarchie d'un problème multicritère	44
Figure 11 Diagramme de déroulement des produits dans le SMC	49
Figure 12 Diagramme des composantes du modèle de simulation	54
Figure 13 Diagramme des lectures de fichiers de données	57
Figure 14 Génération des pannes des processeurs	58
Figure 15 Boucle de génération de la demande des produits	59
Figure 16 Réseau principal du modèle de simulation	61
Figure 17 Schéma d'un sous-réseau du modèle de simulation	62
Figure 18 Exemple de sous-routine de flexibilité de routage.	65
Figure 19 Structure hiérarchique de l'analyse AHP d'un SMC	68
Figure 20 Exemple de pondération quantitative des alternatives, <i>Expert Choice</i>	77
Figure 21 Graphes de sensibilité de l'analyse AHP, <i>Expert Choice</i>	80
Figure 22 Graphes dynamiques de sensibilité de l'analyse AHP, <i>Expert Choice</i>	80
Figure 23 Paramètres généraux de production, Heuristique phase 1.	83
Figure 24 Génération successive des scénarios	86
Figure 25 Schéma d'un aménagement autonome	87
Figure 26 Schéma d'un aménagement avec flux intercellulaire	88

Figure 27	Paramètres de conception pour le scénario #1	91
Figure 28	Résultats de la formation de cellules, scénario #1	92
Figure 29	Paramètres supplémentaires de conception pour le scénario #2	94
Figure 30	Résultats de la formation de cellules, scénario #2	95
Figure 31	Paramètres de conception pour le scénario #3	97
Figure 32	Paramètres relatifs au flux intercellulaire, scénario #4	99
Figure 33	Résultats de la formation de cellules, scénario #6	102
Figure 34	Résultats de la formation de cellules, scénario #7	103
Figure 35	Scénarios possibles pour la phase de simulation	109
Figure 36	Structure hiérarchique de l'analyse multicritère, cas d'application	118
Figure 37	Synthèse du vecteur de priorité pour le premier niveau de critères	119
Figure 38	Synthèse des poids des sous-critères du critère «Investissement».....	119
Figure 39	Synthèse des poids des sous-critères du critère « Performance »	120
Figure 40	Synthèse des poids des sous-critères du critère « Aspect opérationnel».	121
Figure 41	Synthèse des poids des sous-critères du critère «Aspect réalisation».....	121
Figure 42	Synthèse des poids des alternatives de solution, analyse AHP	122
Figure 43	Synthèse graphique des résultats de l'analyse AHP	123
Figure 44	Modification du poids du critère « Performance ».....	124
Figure 45	Modification du poids du critère « Réalisation ».....	124

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AHP :	De l'anglais pour « Analytic Hierachy Process ».
BD :	Base de données
SMC :	Système manufacturier cellulaire
MTBF :	Moyenne des temps de bon fonctionnement
MTTR :	Moyenne des temps de réparation
PM :	Personnalisation de masse
TG :	Technologie de groupe
TUM :	Taux d'utilisation minimal des machines dans l'heuristique

INTRODUCTION

L'aménagement de type cellulaire en milieu manufacturier est très prisé ces dernières années comme solution en réponse à une demande fragmentée du marché qui se veut de plus en plus conditionnée aux préférences des clients. L'ouverture des marchés mondiaux, l'avènement de l'informatique et des nouvelles technologies en milieu manufacturier et l'augmentation de la compétitivité sur les marchés sont en grandes parties les causes responsables du nouveau paradigme de personnalisation de masse (PM) apparu depuis une vingtaine d'année. Mais selon certains chercheurs, l'élément clé qui déclencha ce phénomène fut l'impact technologique des nouveaux moyens de production, voire la venue des nouveaux outils manufacturiers programmables, performants et flexibles qui permettront de produire plus rapidement et économiquement une variété de produits en petits lots, Pine (1993). Ainsi, lorsque ce phénomène de PM fait son apparition dans un secteur du marché, il aura tendance à transformer le profil de la demande et à créer des conditions de vie plus précaires pour les entreprises. Ce changement se fera remarquer par un accroissement de la variété des produits pour des volumes variables en comparaison avec des secteurs manufacturiers beaucoup plus homogènes au niveau des produits où quelques sociétés se dispute le monopole. Pour être plus compétitif dans ces marchés, l'entreprise devra ainsi se doter d'un système manufacturier qui abaissera ses temps de mise en course et qui pourra produire des petits lots à des coûts plus économiques. Olivier et al. (1995).

L'aménagement de type cellulaire est en partie inspiré de la technologie de groupe (TG) et possède les attributs pour donner à une entreprise le niveau de compétition désiré pour demeurer en lice. Cette technologie appliquée à ce type d'aménagement vise à obtenir une configuration performante de cellules autonomes où chacune d'elles possède les processeurs dédiés à sa famille respective de produits (ou de pièces). D'autres concepts beaucoup plus pragmatiques et analytiques ont aussi été développés afin de réorganiser en cellules les activités de production d'une entreprise, mais ces concepts sont malheureusement développés et souvent utilisés pour la transformation d'un système de

production traditionnel en système manufacturier cellulaire et non, pour la conception d'un système totalement nouveau, Black (1991).

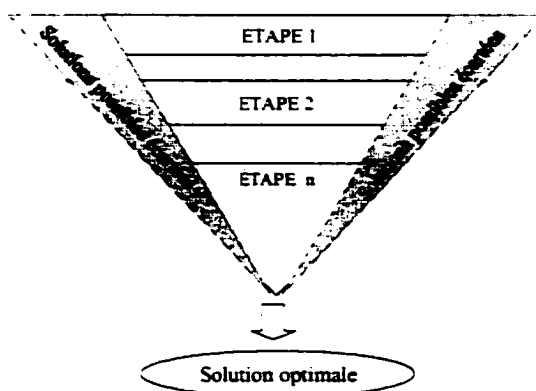
Or, avec un très grand nombre d'éléments à contrôler et à maîtriser, un nouveau système manufacturier cellulaire (SMC) représente un important défi de conception faisant intervenir plus d'un critère de sélection. La problématique de ce mémoire est donc de développer à la fois une méthodologie et un outil d'aide à la décision qui permettra de tenir compte simultanément de l'ensemble des facteurs les plus influents, voire l'aspect multicritère des décisions pour la réalisation d'une telle conception.

Importance et objectif de l'étude

Les principaux gains et avantages de l'implantation d'un système manufacturier cellulaire (SMC) sont notés au niveau d'une baisse des encours, des flux globaux de transports, des temps de mise en route, de la gestion de la production, de la cadence de production. De plus, il apparaît chez les employés un sentiment d'appartenance et de responsabilité envers à leur poste de travail ce qui en fait l'hypothèse d'une baisse des coûts d'outillage et de maintenance et d'une augmentation de la qualité du travail complété. Malgré ses bons côtés, l'aménagement de cellules autonomes possède quelques aspects négatifs qui se font remarquer par un faible taux d'utilisation des processeurs amenant ainsi un coût global de l'aménagement très élevé, ce qui risque de masquer complètement (économiquement) les gains anticipés lors de la conception. De plus, l'aménagement cellulaire où chaque famille de produit est complétée dans sa propre cellule s'avère utopique et même très rare en milieu manufacturier (Wemmerlöv et Hyer 1989). En effet, un environnement industriel est rempli de contraintes d'ordre économique, fonctionnel et humain qui viendront empêcher l'autonomie des cellules forçant ainsi le transfert de produits entre les cellules pour compléter la production. Il devient important de développer une méthode de conception flexible, c'est-à-dire, une méthode permettant de converger vers une solution qui pourra être autant une configuration de cellules autonomes qu'une configuration de cellules avec flux

intercellulaires. Enfin, un outil qui pourra tenir compte des facteurs les plus influents sur la performance du SMC.

Par contre, l'objectif fixé à priori n'est pas de concevoir une boîte noire qui écarterait l'intervention de l'expert sur l'outil de conception. Un outil interactif, dans la manière où le décideur pourrait intervenir pour préciser les critères ou les paramètres, s'avère la voie de cette recherche. La méthodologie de conception souhaitée devrait ainsi permettre de générer plusieurs scénarios satisfaisant les contraintes de production et ensuite d'alimenter en information les critères de décision qui détermine la meilleure solution.



Dans une approche de recherche de solution, l'option d'exploration de type profondeur d'abord peut écarter des solutions optimales.

Figure 1 Recherche de solution optimale

Si on s'inspire de la terminologie des systèmes experts, un autre facteur à tenir en compte est que tout solutionneur empruntant une stratégie recherche de solution de type profondeur d'abord (ou irrévocable) écarte en premier de possibles solutions (Figure 1). À titre d'exemple, on pourrait penser à un système expert avec un module d'optimisation qui ne sortirait qu'une seule solution à la fois et par le fait même, oublier

des meilleures solutions que celle générée. Pour contrer ce problème, la méthode devra proposer au chercheur de générer les scénarios les plus plausibles au tout début et de franchir les étapes subséquentes pour provoquer une compétition entre ces derniers.

Trois méthodes discutées dans la littérature s'avèrent très utiles pour un problème important comme l'élaboration d'un modèle générale de conception de SMC. Il s'agit des heuristiques de formation de cellules, de la simulation et de l'analyse multicritère. Chacune des ces trois méthodologies sera empruntée pour l'élaboration du modèle de conception de SMC.

Beaulieu et al. (1997) ont proposé une méthode heuristique qui fournit une bonne configuration initiale pour la formation de famille de produits et de cellules de machines. Leur algorithme prend en considération les coûts des machines et de l'équipement de manutention, le taux d'utilisation des machines et la flexibilité de routage pour chaque opération. L'heuristique de formation de cellules nous fournit des résultats intéressants. Cependant, ces résultats représentent des solutions de configuration qui ne reflètent que le profil d'un système statique. En effet, les événements stochastiques (pannes, rejet...) qui surviennent dans le temps lorsque le système est mis en route ne sont pas pris en compte lors de la génération de la solution. C'est pourquoi, nous favorisons l'usage de la simulation en second lieu pour mieux connaître ces caractéristiques manquantes à chacun des scénarios. La simulation est une méthode d'analyse d'un système en mode dynamique qui permet d'évaluer ses performances sans avoir à l'implanter physiquement. Elle possède l'avantage de générer des événements stochastiques tel que rencontrés sur le terrain. La simulation fournit donc l'information nécessaire pour évaluer les critères de performance tels que le taux de production, le temps moyen dans le système de chaque produit ou encore le taux d'occupation des processeurs et ce, pour une période de temps définie. Nous privilégions l'usage du langage *Visual Slam* pour sa grande capacité à modéliser les éléments d'un système et leurs attributs et aussi pour sa

compatibilité de communication avec d'autres langages informatiques et logiciels de calculs connus.

En présence d'une multiplicité de critères de décision lors d'une telle situation, la méthodologie de la prise de décision multicritère sera utilisée comme fond d'analyse. La procédure d'analyse hiérarchique (AHP) développée par Saaty (1982) fournit une structure compréhensive pour combiner les valeurs intuitives, rationnelles et irrationnelles des individus. C'est une méthode qui réunit la perception et les objectifs en une synthèse générale. Cantamessa et Turrone (1997) ont proposé une hiérarchie multicritère pour le choix de scénarios d'aménagement cellulaire qui s'avère une bonne source d'inspiration pour les critères de décision de notre modèle.

En résumé, ces travaux ont comme objectifs d'établir les prémices que pourrait avoir une méthodologie complète d'un outil d'aide à la décision pour la conception de systèmes manufacturiers cellulaires. La structure générale de l'outil sera proposée ici en trois (3) phases : la formation de cellules sous différents scénarios, la simulation des scénarios soumis à différentes contraintes ou règles de flexibilité et une analyse multicritère AHP des scénarios (Figure 2). Les scénarios seront construits sur des bases de contraintes fournies par l'environnement de production, par la situation économique de l'entreprise et par les procédures de fabrication. Enfin, nous posons l'hypothèse que le secteur manufacturier destiné à ce modèle général est un secteur où la demande vise des produits qui excluent toute tâche d'assemblage.

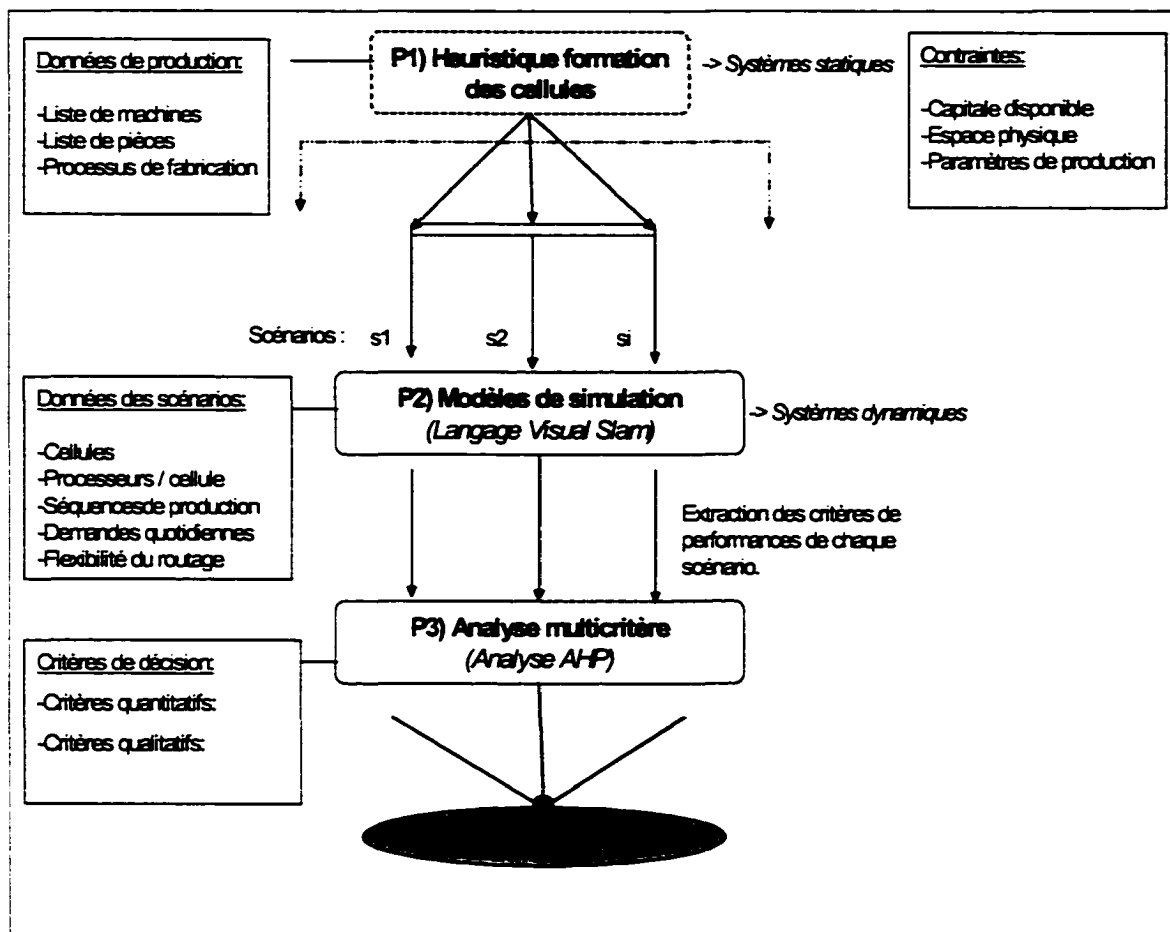


Figure 2 Procédure globale de conception d'un SMC

Organisation du mémoire

Le présent mémoire est composé de 5 chapitres. Le premier comprend une revue de la littérature qui traite des outils de conception des SMC tels que la technologie de groupe, les heuristiques de formation de cellules, les algorithmes génétiques, les systèmes experts, la modélisation qui permet la simulation et l'analyse multicritère. Le second chapitre traite de la méthodologie empruntée et décrit les technologies utilisées dans les trois phases qui constituent la méthode de conception proposée. Le chapitre 3 nous explique comment exploiter l'heuristique pour extraire des scénarios initiaux qui seront modélisés. Cette section renferme la partie la plus laborieuse du projet avec la

description des réseaux du modèle général et les stratégies de simulation pour l'extraction des critères de performance. Ensuite, l'approche multicritère privilégiée est décrite au chapitre 4 où chaque critère est défini ainsi que leur technique de pondération. Le dernier chapitre contient les discussions et l'interprétation des résultats de l'étude d'un cas soumis pour valider le modèle général de conception développé. Enfin, une conclusion complète ce mémoire où une synthèse des présents travaux de recherche et une élaboration sur les travaux futurs et leurs pistes éventuelles seront faites.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux aménagements manufacturiers de type cellulaire et on remarque que bon nombre d'articles et de livres écrits sur le sujet prennent plusieurs orientations techniques. Ce chapitre fait une revue de la littérature sur le sujet en classant par section les différents thèmes d'études. Un des paradigmes de base des outils d'aménagements cellulaires, la technologie de groupe, y est abordé de même que les outils de formation de cellules tels que les heuristiques, les algorithmes génétiques et les systèmes experts. Une revue des applications et développements faits à l'aide de la modélisation, la simulation et les méthodes d'analyse multicritère vient compléter ce chapitre.

1.2 La technologie de groupe

La technologie de groupe (TG) est le moteur de base des outils d'aménagements cellulaires pour plusieurs méthodes développées jusqu'ici dans ce champ de recherche. Dès les années 70, Burbidge (1979) s'intéresse à l'application de la TG en milieu industriel mis de l'avant, auparavant, par Opitz (1970) comme mode de pensée en Russie. À cette époque, Burbidge défait les excuses des économistes envers la faible et misérable performance de l'Angleterre dans les domaines manufacturiers. Il pointe du doigt la planification :

« Un système de production est en contrôle si 90 % des planifications sont rencontrés ». Burbidge (1979), chap.1

Il vante les avantages de l'utilisation de la TG comme soutien au besoin de changement dans l'industrie et à l'amélioration des systèmes de production. Il définit le concept avec

ses principales caractéristiques dont 7 avantages : une diminution du temps de cycle, une baisse des encours, une hausse de la qualité, une diminution des retards sur les livraisons, une baisse des temps de mise en course qui se traduit par une hausse de capacité des processeurs, des avantages économiques et sociaux grâce à la planification et la coordination exécutées en groupe et une augmentation de la valorisation du travail. L'effet du changement est discuté en détail pour chaque niveau de la hiérarchie de l'entreprise : travailleur, contremaître, gérant de production, directeur des ressources humaines. Enfin, cet auteur note que la TG prend origine dans deux racines distinctes : l'une étant les ingénieurs de production qui ont développé les groupes d'éléments ou d'activités similaires et l'autre étant les chercheurs du domaine de la psychologie qui étudiaient des méthodes pour la valorisation du travail en milieu industriel. Évidemment, cela ne fait qu'exposer les avantages de la TG mais ne démontre pas comment arriver à une solution.

Kusiak (1994) démontre aussi les mêmes avantages de l'implantation de la TG en milieu industriel mais note, en plus, une baisse des besoins de main-d'œuvre et d'outillage, une diminution des rebuts et des retouches ainsi qu'un allègement du système de gestion. Selon l'auteur, les études ont prouvé qu'il est virtuellement impossible d'implanter un système manufacturier contrôlé de manière informatisée à l'aide d'automates programmables sans le concept de la technologie de groupe. La formulation des problèmes de TG pour les systèmes manufacturiers automatisés est appuyée par l'objectif de minimiser le coût global du système et de satisfaire les quatre contraintes suivantes :

- a. Ne pas excéder la capacité de chaque machine;
- b. Ne pas excéder la limite permise de transport externe de matériel par cellule;
- c. Ne pas excéder le nombre limite de machines par cellule;
- d. Ne pas excéder la grandeur des cellules.

Plusieurs méthodes de travail ont été développées dans le domaine de la technologie de groupe. On peut diviser en deux classes ces méthodes. Premièrement, il y a la classification qui comprend les méthodes visuelles et les méthodes de codage. La deuxième classe inclut les méthodes de regroupement (« clustering » en anglais) qui comprennent à elle seule trois manières de faire, soit la formulation matricielle, la programmation mathématique et la formulation graphique. La formulation matricielle consiste à réunir sous une matrice les produits et leur séquence d'opérations (Figure 3) où chaque produit sera représenté par une colonne et les machines par les lignes. Les outils développés pour ce problème auront pour tâche de créer des rassemblements de produits partageant les mêmes machines (Figure 4).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	1						1				1
B	1	1	1			1					
C	1	1				1			1		
D				1	1					1	
E			1		1		1				
F			1	1						1	1
G					1			1		1	

Figure 3 Matrice initiale d'incidence produit-machine

	1	2	6	9	3	7	11	4	5	8	10
B	1	1	1								
C	1	1	1	1							
A	1				1	1	1				
E					1	1			1		
F					1		1	1			1
D								1	1		1
G									1	1	1

Figure 4 Matrice finale d'incidence produit-machine

Kusiak résume les outils de formulation matricielle en 6 approches distinctes:

- a. la méthode du « *Coefficient de Similarité* »;
- b. l'algorithme « *Sorting-Based* »;
- c. l'algorithme « *Bond-Energy* »;
- d. la méthode « *Cost-Based* »;
- e. l'algorithme « *Cluster Identification* »;
- f. l'algorithme étendu « *Extended Cluster Identification* ».

La méthode du « *Coefficient de Similarité* », une des premières méthodes développées pour la TG, fut présenté par McAuley (1972) avec l'analyse « *SLCA* » qui était basée sur le coefficient de similarité suivant :

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n d_1(a_{ik}, a_{jk})}{\sum_{k=1}^n d_2(a_{ik}, a_{jk})} \quad (1.1)$$

Où $S_{ij} > K$, représente un seuil de ressemblance entre les machines i et j qui permet leur regroupement.

- d_1 : indice prenant la valeur de "1" si $a_{ik} = a_{jk} = 1$, sinon "0"
- d_2 : indice prenant la valeur de "0" si $a_{ik} = a_{jk} = 1$, sinon "1"
- a_{ik} : le poids dans la matrice d'incidence à la ligne i colonne k .
- a_{jk} : le poids dans la matrice d'incidence à la ligne j colonne k .

Par exemple, pour un problème donné représenté par la première matrice dans l'équation matricielle suivante:

$$\begin{array}{c} \text{machines} \end{array} \begin{array}{c} \text{produits} \\ \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & & & 1 & 1 \\ 2 & 1 & & & \\ 3 & & 1 & & \\ 4 & 1 & & 1 & \end{bmatrix} \xrightarrow{S_{ij} > K} \begin{array}{c} \text{produits} \\ \begin{matrix} 1 & 3 & 2 & 4 & 5 \end{matrix} \end{array} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & & \\ 4 & 1 & 1 & & \\ 1 & & & 1 & 1 & 1 \\ 3 & & & 1 & 1 & \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Les S_{ij} calculés dans la première matrice donnaient les valeurs suivantes:

$$S_{12} = S_{14} = S_{23} = 0/5 = 0.0$$

$$S_{13} = S_{24} = 2/3 = 0.66$$

Ainsi pour un seuil $K = 0.60$, l'analyse SLCA donnait les cellules de machine #1 et #2.

$$\text{Cellule \#1} = \{1,3\}$$

$$\text{Cellule \#2} = \{2,4\}$$

Toutefois, cette méthode repose sur un processus beaucoup trop simple et ne prévoit pas les machines problématiques qui empêcheront un regroupement. Cela arrive lorsqu'une machine est requise dans deux cellules déjà formées et viendra empêcher la séparation des pièces et des machines en groupes distincts. La solution sera d'ajouter une machine de même type dans la matrice pour compléter le regroupement.

L'algorithme « *Sorting-Based* » développé par King (1980), effectue le regroupement dans la matrice d'incidence avec l'aide de poids binaires attribués respectivement aux colonnes et rangées qui seront multipliés aux poids « a_{ij} » de la matrice en 2 étapes distinctes. Ce processus cherche à forcer les regroupements diagonaux dans la matrice.

Avec une procédure du même type, le « *Direct Cluster Algorithm* » (DCA) fut développé par Chan et Miller (1982) et aborde le problème de la même manière mais sans les poids binaires initiaux. Leurs algorithmes sont faciles à programmer, mais possèdent les mêmes lacunes que la méthode précédente.

L'algorithme « *Bond Energy* » est une méthode de permutation des rangées et des colonnes en tenant compte de l'énergie frontalière calculée afin de rassembler les éléments de la matrice pour créer le regroupement diagonal. Beaucoup d'améliorations et de développements furent achevés par différents auteurs à ce sujet, mais leurs accomplissements se limitent au problème de regroupement diagonal dans la matrice d'incidence. De façon plus générale, la méthode « *Cost-Based* » est représentée comme un processus de classification tenant compte de plusieurs coûts tels ceux d'inventaire, de mise en route, d'encours, de machines et de transport. Trois étapes constituent la méthode : classification – codage, groupement et analyse d'aménagement.

Enfin, l'algorithme « *Cluster Identification* » fut développé par Kusiak et Chow (1987) et permet de vérifier l'existence de regroupement dans une matrice d'incidence. Il s'agit d'une technique de traçage de lignes horizontales et verticales qui marquent les indices « 1 » de la matrice d'incidence. Cette méthode fonctionne par réduction de la matrice : les rangées et les colonnes sont éliminées par étapes successives afin de former les cellules de machines et les familles de pièces. Les étapes de l'algorithme appuyées d'un exemple de cas sont présentées ici-bas.

- a. Étape 0: Poser numéro de l'itération $K = 1$.
- b. Étape 1: Choisir n'importe quelle rangée i de la matrice d'incidence $A^{(k)}$ (matrice A à l'itération k). Tracer une ligne horizontale h_i , à travers la rangée choisie.
- c. Étape 2: Pour chaque entrée « 1 » dans l'intersection de h_i , tracer une ligne verticale v_j .

PRODUITS

1 2 3 4 5 6 7 8

MACHINES

$A^{(1)} =$

1								h_1
2	1					1		
3			1			1		
4					1			
5							1	
6			1					
7					1		1	

$v_2 \quad v_3 \quad v_5$

(1.3)

- d. Étape 3: Pour chaque entrée « 1 » traversée par la verticale v_j , tracer une nouvelle ligne horizontale h_i .
- e. Étape 4: Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'entrée « 1 » traversée une seule fois.

$A^{(1)} =$

1								h_1
2	1					1		
3			1			1		
4					1			
5							1	h_5
6			1					
7								h_7

$v_2 \quad v_3 \quad v_5$

\Rightarrow

1								h_1
2	1					1		
3			1			1		
4					1			
5							1	h_5
6			1					
7								h_7

$v_2 \quad v_3 \quad v_5 \quad v_8$

(1.4)

- f. Étape 5: Transformer la matrice d'incidence $A^{(k)}$ en $A^{(k+1)}$, en enlevant les colonnes et les lignes correspondant à toutes les lignes horizontales et verticales tracées dans les étapes de 1 à 4 (qui formeront la 1^{ère} cellule de machines MC-1 {1, 5, 7} et 1^{ère} famille de produits PF-1 {2, 3, 5, 8}).
- g. Étape 6: Si matrice $A^{(k+1)} = 0$ (vide), arrêter, sinon poser $k=k+1$ et aller à l'étape 1.

$$A^{(2)} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} & 1 & 4 & 6 & 7 \\ \begin{array}{c} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 6 \end{array} & \left[\begin{array}{cccc} | & & & \\ | & 1 & & 1 \\ | & & & \\ | & 1 & & \end{array} \right] & \begin{array}{c} h_2 \\ \\ h_4 \end{array} \end{array} \end{array} \quad (1.5)$$

$v_1 \qquad v_6$

Suite à une seconde exécution des étapes 1 à 5, la seconde matrice généra la cellule de machines MC-2 {2, 4}, PF-2 {1, 6}.

$$A^{(3)} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & 4 & 7 \\ \begin{array}{c} 3 \\ 6 \end{array} & \left[\begin{array}{cc} | & | \\ | & | \\ | & | \end{array} \right] & \begin{array}{c} h_3 \\ h_6 \end{array} \end{array} \end{array} \quad (1.6)$$

$v_2 \quad v_7$

Enfin, la dernière matrice donna MC-3 {3, 6} et PF-1 {4, 7}.

Cet outil donne de très bons résultats et a déjà été intégré à l'heuristique de formation de cellule qui prenait en compte la contrainte du nombre de machines par cellule et le problème des machines problématiques empêchant un regroupement distinct. Kusiak (1992). Dans un second temps, ce dernier a étendu l'algorithme, « *Extended Cluster Identification* », en ajoutant simplement une étape qui prend en compte l'expertise du décideur à certains endroits dans la méthode.

La deuxième manière de traiter les problèmes de technologie de groupe est la programmation mathématique. Cette dernière repose sur des mesures de distances entre les pièces. Plusieurs types de distances existent : *Minkowski*, *Weighed Minkowski* et *Hamming*. Les trois modèles que Kusiak (1994) recommande tiennent compte de la mesure de distance en utilisant un coefficient de similarité. Ces modèles sont le « *P-Median* », le « *P-Median Généralisé* » et un modèle de programmation quadratique.

Moins exploitée et développée, la dernière manière de faire relative à la technologie de groupe que Kusiak présente est la formulation graphique. Trois types de graphes sont recommandés mais demeurent rares dans la pratique et l'expérimentation ; le graphe « *Bipartite* », le graphe de transition et le graphe « *Boundary* ».

Les outils que Kusiak présente demeurent des composantes de base pour un moteur de résolution de problème de SMC. Certains de ces outils offrent des alternatives intéressantes, mais doivent être jumelés à d'autres processus de décision pour contrer certaines faiblesses. Par exemple, de ces outils présentés, aucun ne peut traiter les problèmes en tenant compte de plus d'une alternative de routage, soit diverses séquences d'opérations pour les produits.

1.3 Outils de formation de cellules

De nombreux chercheurs ont développé des outils de formation de cellules à l'aide de la TG pour pallier aux problèmes de conception de SMC. Ces outils peuvent être classés en trois catégories différentes, quoique parfois, quelques-uns d'entre eux empruntent un savoir-faire de l'autre. Ces catégories sont les heuristiques, les algorithmes génétiques et les systèmes experts. Elles sont présentées dans les sections qui suivent.

1.3.1 Heuristiques de formation de cellules

Par définition, un outil heuristique est une méthode de découverte de solution qui vise, non pas à trouver une solution optimale mais, à trouver une bonne solution réalisable. Beaulieu et al. (1997) ont élaboré une heuristique de formation de cellules qui peut permettre le flux intercellulaire. On entend par flux intercellulaire, les transports de produits entre les cellules et non à l'intérieure d'une même cellule. Leur heuristique vise des applications telles que les ateliers d'usinage. Ils proposent la recherche de solution en 2 phases: la formation de cellules indépendantes dans un premier temps suivi d'une

phase d'élimination de machines sous-utilisées en faisant intervenir le flux intercellulaire. Dans la première phase, les auteurs utilisent un coefficient de similarité afin de réunir les cellules les plus similaires avant d'effectuer leur choix de machines à l'aide d'un algorithme de sélection de machines. L'algorithme utilisé pour effectuer ce dernier choix cherche à minimiser les coûts d'acquisition et d'opération. Dans la deuxième phase, on propose de faire intervenir le mouvement intercellulaire des pièces afin d'éliminer les machines sous-utilisées. Un nouvel algorithme est utilisé à cette fin ayant toujours comme critère de minimiser le coût de la configuration globale. Cette approche globale de conception de système manufacturier cellulaire fournit de bons scénarios de base de SMC et permet d'obtenir une estimation des coûts initiaux et récurrents. Toutefois, tel que mentionné déjà, l'heuristique offre seulement une vue statique de chaque scénario. De plus, l'heuristique ne prévoit pas l'effet des événements stochastiques qui surviendront durant la vie du système.

Wu et Salvendy (1999) se sont intéressés à la problématique de reconfiguration d'un système de production par la formation de cellules où il y a plusieurs machines identiques dans différentes cellules de l'usine et, au problème d'assignation des opérations aux machines de même type dispersées dans les cellules. Les auteurs présentent une heuristique composée d'une approche graphique de formation de cellules appuyée ensuite d'une fonction objectif qui minimise les coûts de transports. Leur méthode tient compte des séquences des opérations, de la capacité nécessaire par opération et des coûts de transport entre les machines. La recherche de solution est donc faite graphiquement en joignant les machines d'une séquence qui possèdent les distances les plus coûteuses. La solution est trouvée lorsqu'il n'y a plus de machines à joindre et que les limites de machines permises par cellule sont rencontrées. Malgré qu'elle représente une alternative intéressante pour la résolution de problème de conception de SMC, leur méthode s'applique seulement dans le cas où les distances entre les cellules seraient connues à l'avance et, tout comme l'heuristique précédente, présente une solution plausible, mais statique d'une configuration d'un SMC.

En résumé, les auteurs de la dernière heuristique font l'hypothèse que les séquences d'opérations n'ont aucune alternative de routage, c'est-à-dire, sans possibilité qu'une opération soit faite sur plus d'un processeur s'il survient un événement imprévu. Par contre, l'heuristique de Beaulieu et al. (1997), décrit juste avant, prévoyait cette flexibilité en partageant la charge de la demande sur plus d'une machine si cela était plus économique. Or, il est rare de trouver une situation dans l'industrie où cette forme de flexibilité de routage n'est pas requise. Tenir compte de ce facteur augmentera de beaucoup le degré de difficulté du problème de conception car plus d'une variable intervient quand il est temps de choisir le meilleur processeur pour une opération donnée. Mungwattana (2000) s'est intéressé à cette problématique et a développé une heuristique qui tient compte de la flexibilité de routage des opérations dans un environnement stochastique. L'heuristique permet le flux intercellulaire et la relocalisation de machines à une autre cellule. Il repose sur un modèle mathématique de programmation linéaire qui prend en compte cette flexibilité et cherche à minimiser le coût global de la nouvelle configuration (machines, opérations, transport et relocalisation d'une machine). L'heuristique comprend six phases. Une sélection des meilleurs routages est faite à l'aide d'un algorithme qui minimise les coûts des machines et des opérations. Les étapes suivantes génèrent une configuration et l'améliorent ensuite en faisant appel au modèle mathématique et un algorithme de recuit simulé respectivement. Pour obtenir un raffinement de la solution, l'heuristique possède une étape d'élimination de machines et une autre de relocalisation de machines afin d'abaisser les coûts de machines tout en prenant pour acquis une légère hausse des coûts de manutention. La condition d'arrêt est fixée par une limite de réplication. Mais tout comme les autres méthodes vues plus haut, le manque d'informations concernant le scénario de système de production en mode dynamique est présent. Ce fait ne permet pas au décideur d'opter pour une solution minimisant les risques d'échec à l'implantation.

1.3.2 Algorithme génétique

L'algorithme génétique est l'une des dernières générations d'outils de recherche de solutions inspirée de l'intelligence artificielle. Il représente une très bonne alternative pour la conception d'une nouvelle configuration de SMC. Mak et al. (2000) ont développé une nouvelle approche de formation de cellule basée sur le concept des algorithmes génétiques de Goldberg (1988). Leur méthode se limite strictement au problème de formation de cellule à partir d'une matrice d'incidence produit-machine. L'algorithme consiste à générer initialement une famille de solutions dites candidates qui sont encodés numériquement et qui serviront par la suite au croisement et à la mutation de nouveaux individus (solutions). Chaque solution est évaluée selon leur qualité respective à l'aide d'une fonction « α » qui mesure l'énergie frontalière tel que le fait l'algorithme « *Bond Energy* » discuté à la section 1.2. Ainsi, les individus les plus performants auront une plus grande chance d'être combinés ensemble ce qui permettra d'exploiter les régions de solutions les plus prometteuses. L'algorithme possède une étape de calcul tenant compte de l'amélioration ou de la dégradation de la recherche pour chaque nouvel individu généré. Ceci permet d'adapter l'opérateur génétique pendant la recherche de solution. La meilleure solution est retenue lorsqu'un nombre prédéfini de générations est atteint. Malgré que leur outil se limite simplement au problème de regroupement avec la matrice d'incidence, ceci représente une très bonne avenue de recherche, car leurs résultats se sont avérés meilleurs (comparés à un même cas) que d'autres outils déjà cités la littérature.

Dans un autre type de problématique, deux auteurs ont développé des outils de ce genre pour l'étape d'aménagement des systèmes manufacturiers. D'abord, Rao et al. (1999) ont développé un algorithme génétique pour le réaménagement d'un système manufacturier. Leur méthodologie intègre l'algorithme génétique au populaire logiciel de dessin *AutoCAD* qui reçoit l'information de regroupement de cellules et qui la transforme, par le biais d'un algorithme interne au logiciel, en solution d'aménagement.

Pour cette application, la fonction d'aptitude évaluant la performance d'une solution repose sur des mesures de distance entre les machines. De façon similaire, Islier (1998) a développé un algorithme génétique qui vise la résolution de problèmes multicritères d'aménagement. L'outil développé fournit sous forme d'une matrice la solution d'aménagement des départements avec leur nombre de cellules. Ces outils présentent les mêmes limites que les heuristiques cités auparavant. De plus, il est question pour les deux dernières références de réaménagement d'un système de production existant au lieu de la conception d'un tout nouveau SMC.

1.3.3 Système expert

Dans un ordre d'idées beaucoup plus globales pour la résolution d'un problème de conception de SMC, les systèmes experts ou à base de connaissances permettent de tenir compte de la connaissance de l'expert et d'aller beaucoup plus loin dans le développement et le raffinement d'une solution mais, nécessite pour cela un développement beaucoup plus laborieux.

Kusiak (1994), au chapitre 9 de son livre, nous présente un système à base de connaissances nommé «*Knowledge Base Groupe Technology (KBGT)*» pour la résolution de problème de conception de SMC incluant des machines automatisées. La structure du système expert est composée de 5 éléments : la base de données, la base de connaissance, le moteur d'inférence, le processeur de requête et l'algorithme de regroupement (Figure 5). *LISP* fut le langage utilisé pour *KBGT*. L'algorithme utilisé par *KBGT* est celui du «*Cluster Identification Algorithm*» modifié pour interpellier le moteur d'inférence afin de vérifier les règles de production du système expert. Les pièces responsables d'un goulot d'étranglement sont gérées indépendamment et sont rejetées du système pour être produites par un système indépendant de type fonctionnel ou atelier de production.

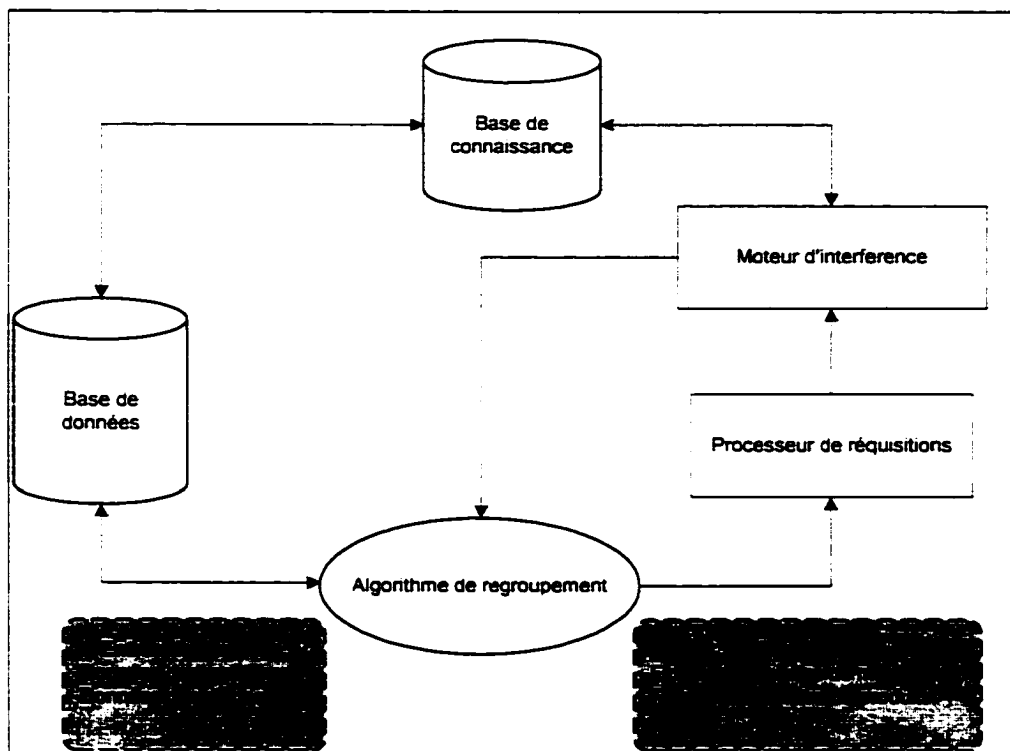


Figure 5 Système expert KBGT pour la formation de cellules (Kusiak 1994)

1.4 Modélisation et simulation

Tel que vu auparavant, une panoplie d'outils furent développés pour la conception de SMC, mais la plupart d'entre eux, voire presque la totalité, nous proposent des solutions d'ordre statique. On entend par solution statique, une configuration de système qui a été construite sans avoir validé l'effet temporel des événements discrets ou continus et des variations déterministes ou stochastiques. En effet, seul l'implantation d'un scénario de configuration nous permettra de vérifier dans un mode dynamique l'exactitude des performances prévues par les outils. Pour pallier à ce besoin d'informations sur les critères de performance, les modèles de simulation se sont avérés des outils très puissants et économiques pour représenter la réalité par un moyen informatique. Un très grand nombre de simulateurs furent développés pour le milieu manufacturier, ce qui laisse aux concepteurs l'embarras du choix. McGinnis et al. (1998) ont fait une revue

exhaustive de la dernière vague d'outils de simulation de type orienté objet pour les systèmes manufacturiers qui permet de valider les avantages et les inconvénients de chacun. Leur recherche vise à évaluer l'état de l'art pour les simulateurs de système manufacturier qui sont construits avec la programmation orientée objet et aussi à élaborer les possibilités et les nouvelles avenues de recherche que ces développements informatiques amènent. Par ailleurs, une intéressante publication pour effectuer un choix de simulateur est la revue annuelle des outils de simulation de la revue IIE Solutions qui les cite et les compare, Elliott M. (2000).

L'une des premières tâches qui mène à la simulation est la récolte de données qui servira à la modélisation. Gelenbe et Guennouni (1991) nous présente FLEXSIM, un outil de simulation qui possède une interface permettant de communiquer avec une base de données industrielle où la modélisation devient facilitée et plus réaliste. Dans le même type d'application, les logiciels commerciaux de simulation tel que *AweSim*, *Promodel*, *AutoMod*, etc. permettent, à différents degrés de flexibilité informatique, l'échange de données avec d'autres outils informatiques. Par exemple, Karabakal (1997) a utilisé *Promodel*, *CPLEX* et *Excel* pour réaliser une étude de cas d'une chaîne d'approvisionnement pour l'industrie automobile. *CPLEX* est une application informatique dédiée à la résolution de problème de programmation mathématique. Il agissait ici comme outil d'optimisation d'un modèle mathématique qui transmettait les paramètres optimaux du système par le biais du tableur *Excel* au simulateur *Promodel*. Cette expérience, réalisé pour le compte d'un important manufacturier automobile, montre bien le besoin d'intégrer les outils de recherche de solution avec la simulation.

Pritsker (1998) présente pour sa part les avantages de *Visual Slam* (une évolution du langage *SLAM II*) avec le logiciel *AweSim* comme un programme qui permet la communication avec les logiciels d'édition et des bases de données. Il supporte en plus l'utilisation de sous-routines en *Visual Basic* et *C++*. Le simulateur possède la flexibilité de générer plusieurs scénarios en reprenant les objets déjà développés dans

des étapes antérieures. La modélisation peut être faite à partir de réseaux et sous-réseaux composés de divers nœuds et d'arcs représentant les activités.

La littérature fait état de l'efficacité de *SLAM II* et de *AweSim* pour la modélisation de SMC. Gharbi (1992) et Irizarry (2001) ont tiré avantage de la flexibilité de *SLAM II* pour modéliser une cellule manufacturière. Le premier auteur a utilisé cet outil de modélisation pour l'étape de simulation d'un cas de conception d'une cellule d'usinage. Son modèle comprend les machines et les équipements de manutention comme ressources et fait intervenir des événements stochastiques pour les pannes et les commandes. Il utilise des sous-routines en Fortran pour communiquer avec la base de données du simulateur pour l'allocation des ressources selon des règles de priorité. De façon similaire, le second auteur utilise *SLAM II* comme une partie intégrée à un modèle de conception et d'analyse de cellule manufacturière. Tout comme le premier auteur, il cherche à extraire de la simulation les données des caractéristiques du système qui serviront à une analyse de la variance (ANOVA). Son modèle représente une cellule d'assemblage de circuits imprimés et fait appel à des routines écrites en Fortran pour une simulation par événements discrets. Les deux auteurs proposent chacun une bonne démarche, mais leur modèle de simulation se limite à une seule cellule.

1.5 Analyse multicritère

L'analyse multicritère AHP de Saaty (1982) a été beaucoup utilisée pour aider le décideur dans un problème faisant intervenir plus d'un critère. Elle a l'avantage de compiler des mesures qualitatives et quantitatives sur un même vecteur prioritaire. Myint et Al (1994) abordent le problème de sélection de machines dans un environnement cellulaire avec l'approche multicritère AHP et la programmation linéaire. Ils proposent deux utilisations de l'analyse multicritère. La première consiste en une phase pré-criblage pour filtrer les configurations possibles et la deuxième pour le choix des scénarios de solution. Cette phase est utilisée en premier lieu pour préciser le genre

de configuration du système de production en fonction des caractéristiques de la demande; c'est-à-dire, où se situent les produits dans leur cycle de vie et quel type d'investissement doit-on leur attribuer? Le concepteur tiendra compte dans cette première analyse des caractéristiques du produit, des critères économiques et des performances requises du système de production. La deuxième phase englobe deux parties importantes : la programmation par objectifs pour déterminer le nombre optimal de machines et, à nouveau, l'analyse multicritère pour raffiner le nombre de machines en tenant compte de plus d'un critère qualitatif. La programmation par objectifs établit une équation sujette à une série de contraintes et prend en compte le poids des objectifs du concepteur. L'équation cherche à minimiser le nombre de palettes et de fixations, la surcharge et la sous-utilisation des machines. Une fois la solution obtenue, l'analyse AHP est réutilisée pour traiter les notions de poids pour trois critères : la capacité (pourcentage d'utilisation de la machine et le nombre moyen de pièces en file), la flexibilité (capacité de faire plus d'un type d'opérations) et le critère économique (valeur présente de la configuration).

Cantamessa et Turrone (1997) ont aussi utilisé l'approche multicritère AHP pour orienter l'entreprise vers un choix de système de SMC. Quatre types de solutions dont une, était purement des cellules autonomes et les autres, des solutions intermédiaires. Ces dernières pouvaient être réalisées avec l'ajout de transport intercellulaire, la sous-traitance de certaines pièces ou encore un système hybride. L'analyse multicritère était utilisée en première étape d'un modèle de conception de SMC. Ils ont déterminé une structure d'évaluation en décomposant le problème en 5 critères principaux. Quatre d'entre eux comprenaient des choix stratégiques ayant un impact sur toute une entreprise alors que le dernier concernait les opérations et n'avait d'influence que sur le plancher de production. Les quatre premiers critères principaux étaient l'investissement, la complexité de gestion, la faisabilité et les ressources humaines. Le dernier critère représentait les aspects opérationnels et comprend les coûts d'opération et la complexité de gestion des opérations. Chacun de ces critères principaux était défini à l'aide de

sous-critères permettant de préciser les caractéristiques de chacun. Les auteurs ont intégré le vecteur prioritaire obtenu à l'algorithme « *Branching Algorithm* » de Kusiak (1992) afin d'obtenir une solution à un problème de formation de cellules. L'arbre hiérarchique des critères développés dans leur travail représente une très bonne référence pour les problèmes de conception de SMC.

CHAPITRE 2

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

2.1 Introduction

Les méthodologies et les approches sélectionnées pour composer notre outil d'aide à la décision pour la conception de SMC sont décrites dans ce chapitre. Ce dernier est composé de trois sections qui décrivent et valident le choix et l'utilisation de chaque méthode. La structure de l'outil présentée à la figure 6 comprend trois phases représentant chacune des méthodologies de résolution où les informations d'entrée et de sortie sont citées. Ces méthodes sont respectivement l'heuristique de formation de cellules qui a pour tâche de générer les scénarios de configuration, la simulation servant à extraire les critères de performance et l'analyse multicritère où la décision du choix du meilleur système est faite. Ainsi, la méthode de conception débute par l'utilisation d'un heuristique de formation de cellules qui requiert l'entrée de données et de paramètres de production. La génération de scénarios est secondée par une étape de filtrage assurée par l'intervention du concepteur. En modifiant les paramètres de production, le concepteur guidera l'heuristique vers les meilleures solutions qu'elle pourra fournir. Par la suite, les scénarios seront transmis à la phase de simulation. Une fois les caractéristiques des scénarios transmises au modèle de simulation, cette deuxième phase est secondée par un processus de filtrage qui permet d'évaluer quelle politique de flexibilité est la plus avantageuse pour chacun des scénarios. Enfin, la troisième et dernière phase de l'outil consiste à évaluer les scénarios sur une base de plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs à l'aide des informations de sorties des phases 1 et 2.

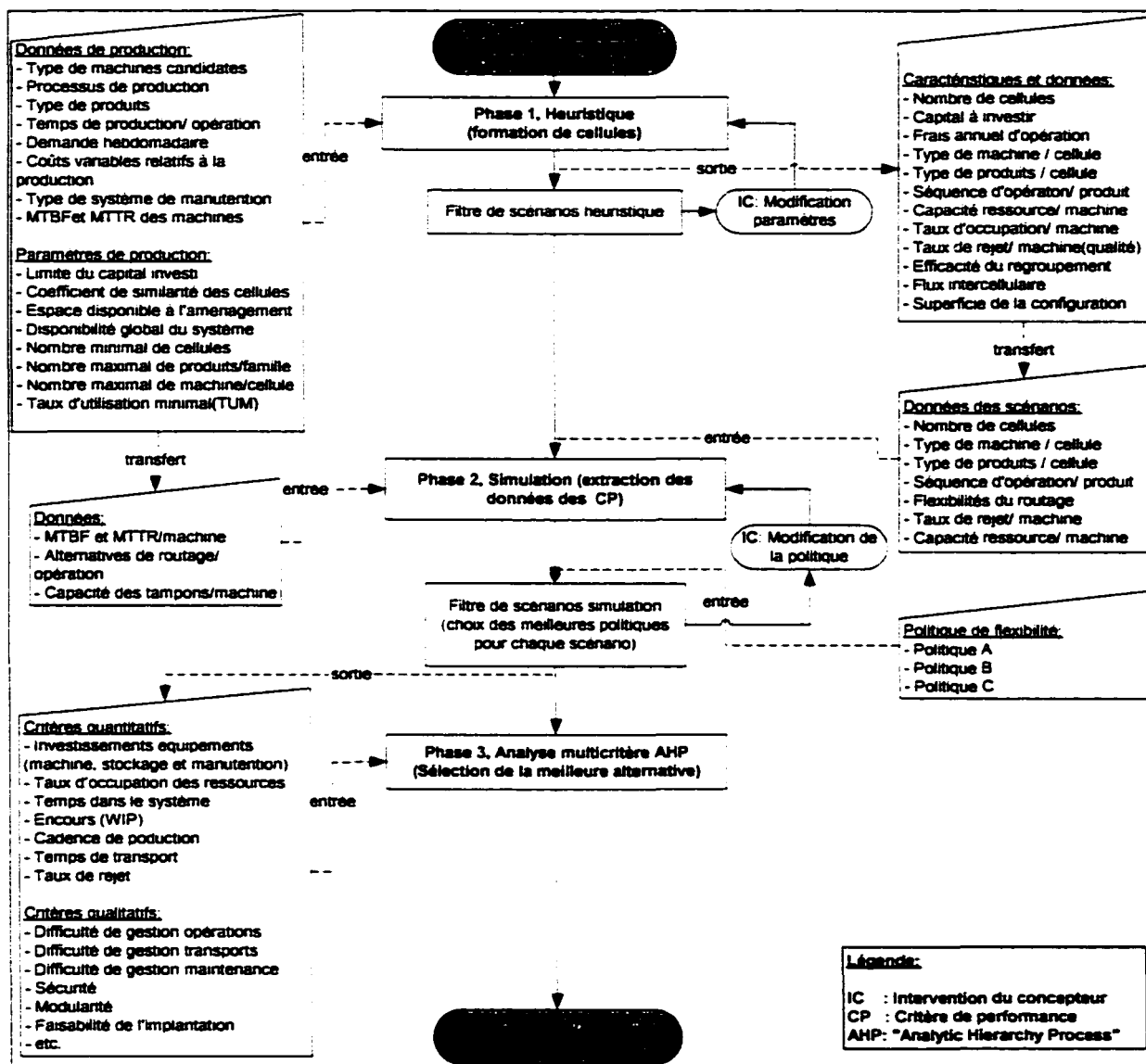


Figure 6 Modèle général d'outil d'aide à la décision pour la conception de SMC.

2.2 Heuristique de formation de cellules

2.2.1. Mécanisme de l'heuristique

L'heuristique de formation de cellules retenue pour le modèle fut proposée par Beaulieu (1994). De façon progressive et séquentielle, l'heuristique permet de générer différents

scénarios avec ou sans flux intercellulaire et d'imposer, au besoin, des pièces à chaque cellule avec le concept de pièces-clés. Elle est présentée à la figure 7 sous forme de logigramme. L'approche nécessite *a priori* de préciser les paramètres généraux de production tels que la capacité disponible du système en nombre d'heures par semaine, l'espace maximal permis pour l'aménagement, etc. Elle prend aussi en considération les coûts des processeurs et des équipements de manutention, le taux d'occupation des processeurs et les différentes alternatives de procédés pour chaque opération. Cette heuristique peut être vue comme une composition de trois étapes de conception de système manufacturier cellulaire : formation de cellules autonomes, formation de cellules avec flux intercellulaire et formation de cellules avec le concept de pièces-clés. Cette approche a déjà été utilisée pour la programmation d'un logiciel qui sera utilisé pour la génération des scénarios dans le cas d'application au chapitre 5.

La première étape consiste à former des cellules indépendantes qui complètent toutes les opérations de production de leur famille de produits respective. Initialement, l'heuristique débute la formation avec une configuration composée d'une cellule pour chacun des produits. Ensuite, elle procède à la fusion des cellules à l'aide d'un coefficient de similarité $CSCL_{kl}$ qui mesure le niveau de ressemblance de deux cellules « k » et « l » basé sur la compatibilité des processeurs qu'elles possèdent de part et d'autre. Ce coefficient est calculé pour toutes les cellules selon la formule suivante proposée par Luong (1993) :

$$CSCL_{kl} = \max \left[\frac{NTC_{kl}}{NMC_k}, \frac{NTC_{kl}}{NMC_l} \right] \quad (2.1)$$

où

NTC_{kl} : nombre de types de processeurs que les cellules k et l ont en commun;

NMC_k : nombre de types de processeur utilisés dans la cellule k (ou l).

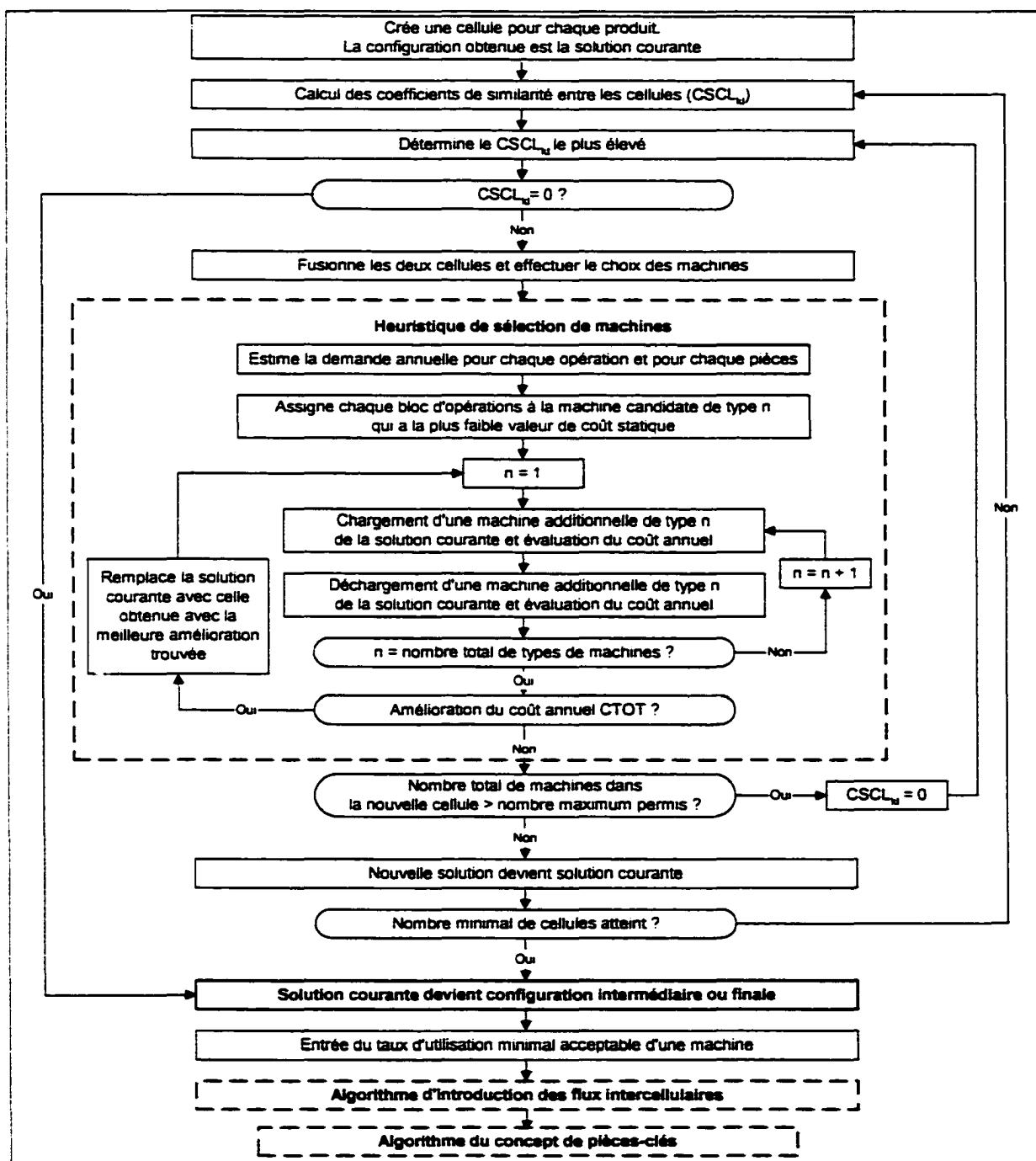


Figure 7 Logigramme abrégé de l'heuristique de formation de cellules.

L'heuristique choisira en premier le couple de cellules possédant le coefficient le plus élevé et procédera leur fusion. À chaque nouvelle fusion de cellules, le choix le plus économique pour des processeurs est refait à l'aide d'une heuristique de sélection de machines (ou processeurs) intégrée à l'autre. Ce nouveau choix de machines vise à minimiser le coût d'exploitation annuel $CTOT$ de la cellule.

$$CTOT = \sum_{n=1}^{NMC} (MNB_n * (MFC_n + MVC_n * UT_n)) \quad (2.2)$$

Où

NMC : nombre de type de machines dans la cellule;

MNB_n : nombre de machines de type n à acheter;

MFC_n : coûts fixes annuels de la machine de type n (amortissement);

MVC_n : coûts variables annuels d'une machine de type n utilisé à pleine charge (énergie, maintenance, ...);

UT_n : taux d'utilisation réel de la machine de type n (nombre de machines requises sur le nombre à acheter) .

Pour effectuer le choix de machines, l'outil procède par chargement et déchargement de machines de chaque type candidates pour la production afin de trouver la solution dont le $CTOT$ sera minimal. L'étape de fusion et de sélection de machines se répète jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de coefficient supérieur au coefficient minimal fixé dans les paramètres de conception ou que le nombre minimal de cellules est atteint. Une fois complétée, cette étape pourra constituer un scénario d'aménagement si l'on désire exclure tout flux intercellulaire.

La deuxième partie de l'heuristique débute avec la dernière solution trouvée et un taux minimal permis d'utilisation des machines (TUM) fixé par le concepteur. L'algorithme d'introduction de flux intercellulaire débute par la recherche du type de machine dans une cellule ayant le taux d'utilisation le plus bas. Une fois le type de machine trouvé, on

retranche une machine de ce type et on prend soin de libérer toutes les opérations assignées à cette dernière pour les réassigner à une autre cellule de la configuration et ce, en recherchant un coût annuel de cellule minimal. Cette routine se poursuit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de type de machine à retrancher avec un taux inférieur au TUM et qu'il n'y ait plus d'amélioration du coût annuel CFI de la solution recherchée.

$$CFI = CAA + \sum_{i=1}^{VP} \sum_{j=2}^{NO_i} (PR_{ij} * CTP) \quad (2.3)$$

Où

CFI : coût d'exploitation annuel de l'atelier en considérant les transferts intercellulaires et le coût des machines;

CAA : somme des CTOT de chaque cellule;

PR_{ij} : taux de production annuel de l'opération j sur le produit i;

CTP : coût de manutention pour chaque unité transférée entre deux cellules.

La dernière étape de l'heuristique fait intervenir le concept de pièces-clés pour modifier au besoin les configurations antérieures ou satisfaire des contraintes de procédé de production ou encore de baser le regroupement sur un coefficient similarité CSPP entre les produits et un coefficient d'affinité CSPC entre une cellule et un produit.

$$CSPP_{ab} = \max \left[\frac{NMC_{ab}}{NTM_a}, \frac{NMC_{ab}}{NTM_b} \right] \quad (2.4)$$

Où

NTM_a : nombre de types de machines candidates pour le produit a (ou b);

NMC_{ab} : nombre de types de machines candidates que les produits « a » et « b » ont en commun.

À ce stade de l'heuristique, le concepteur doit déclarer un nombre de cellule à créer et y imposer un produit par cellule. Par la suite, l'algorithme générera la solution en

effectuant une affectation initiale des produits basée sur les meilleurs CSPC des produits face aux cellules et tentera d'améliorer le CAA de sa solution par une seconde étape de réaffectation des produits. Cette dernière opération est accompagnée d'une valeur minimale du coefficient d'affinité fixé par le concepteur qui limite les calculs inutiles.

$$CSPC_{ki} = \frac{CMC_{ki}}{NO_i} \quad (2.5)$$

Où

CMC_{ki} : nombre d'opérations du produit i pouvant être complétées dans la cellule k selon leurs alternatives de routage;

NO_i : nombre d'opérations sur le produit i .

Enfin, à cette étape, l'heuristique génère une nouvelle configuration de cellules autonomes. Le concepteur peut faire à nouveau intervenir l'algorithme d'insertion de flux intercellulaire pour éliminer les machines sous-utilisées.

2.2.2 Données d'entrée de l'heuristique

Les informations de base pour générer les scénarios sont regroupés dans quatre bases de données principales : les machines, les pièces, les opérations et les procédés. La base de données des machines comprend les informations suivantes:

- a. le nom et le numéro du type de machine;
- b. le coût unitaire d'acquisition des équipements;
- c. les coûts moyens de fonctionnement et de réparation;
- d. la durée de vie;
- e. les dimensions physiques;
- f. la grandeur des tampons d'entrée et de sortie;
- g. le temps moyen entre chaque panne, MTBF;

- h. le temps moyen de réparation, MTTR;
- i. le taux d'utilisation maximal.

Les informations contenues dans la base de données des pièces sont:

- a. le nom et le numéro de la pièce ;
- b. la demande hebdomadaire;
- c. le coût de la matière première;
- d. le prix de vente;
- e. la valeur de récupération en cas de rejet.

Les deux dernières bases de données partagent l'information relative aux séquences d'opération. La base de données des opérations contient seulement la description de l'opération incluant le nom de la pièce et de l'opération, le numéro de la séquence et la valeur ajoutée de l'opération. La base de données des procédés détient les informations relatives aux possibilités de routage de chaque opération. Ces informations sont:

- a. le numéro de pièce et de l'opération ;
- b. les machines candidates pour chaque opération ;
- c. les temps d'usinage et de mise en course;
- d. le taux de rejet.

De plus, pour compléter les bases de données de l'heuristique, les paramètres généraux de conception sont contenus dans un même fichier et comprennent la disponibilité du SMC en nombre d'heures de production, le taux d'intérêt d'emprunt, le capital maximal d'investissement et la surface maximale permise de l'aménagement.

2.2.3 Stratégie de création de scénarios

Tel que vu à la figure 6, la génération de scénarios est un processus séquentiel et réversible où le concepteur construit ses scénarios en modifiant par essais répétitifs les paramètres influant sur la configuration. Ce processus de conception fait que les scénarios créés deviennent la source d'informations pour la conception des futurs scénarios. Ces informations servent ainsi à fixer les nouveaux paramètres relatifs à chaque type de conception. Le tableau I résume les types de conception possibles et les paramètres qui contrôlent la génération des scénarios.

Tableau I

Paramètres de conception en fonction du type de configuration, phase I

Type de configuration	Paramètres de conception
1- Cellules autonomes	Coefficient de similarité $CSCL_k$ Nombre minimal de cellules à créer Nombre maximal de pièces par cellule Nombre maximal de processeurs par cellule Surface maximale des processeurs par cellule
2- Cellules avec flux intercellulaire	Coefficient TUM Type de système de manutention
3- Pièces-clés, cellules autonomes	Pièces-clés imposées aux cellules Nombre de cellules imposées Nombre maximal de pièces par cellule Nombre maximal de processeurs par cellule Surface maximale des processeurs par cellule Coefficient minimal d'affinité ($CSPC_k$)
4- Pièces-clés, avec flux intercellulaire	Coefficient TUM Type de système de manutention

Le concepteur tirera avantage à exercer des tentatives de génération de solutions en faisant varier les valeurs de ces paramètres. Lors des présentes expériences avec le cas d'application présenté au chapitre 5, on a pu observer l'effet des variations des valeurs de la plupart des paramètres. Ces observations sont résumées au Tableau II.

Tableau II

Liste des paramètres de conception et leurs effets dans l'heuristique

Paramètres	Effets de variations sur la configuration
Nombre maximal de produits par famille	<i>Un petit nombre tendra à former un nombre élevé de cellules et parfois, à créer des cellules avec un seul produit. Un nombre élevé libérera l'heuristique de cette contrainte.</i>
Nombre maximal de processeurs par cellule	<i>Un nombre élevé tendra à former une ou deux cellules disproportionnées par rapport aux autres en nombre de processeurs. Par contre, un nombre peu élevé tendra à uniformiser la grosseur des cellules.</i>
Taux d'utilisation minimal (TUM)	<i>Avec l'intervention du flux intercellulaire, un TUM faible aura tendance à être peu sévère sur l'utilisation des processeurs, ce qui occasionnera peu de transports intercellulaires. À l'opposé, un TUM élevé, voire sévère, aura tendance à créer beaucoup de transports intercellulaires, mais améliorera de façon significative le coût de l'investissement, l'espace nécessaire à la configuration et l'efficacité du regroupement cellulaire. Suite aux présents travaux de recherche, on proposera au concepteur de débiter sa conception avec un TUM moyen de 40 à 45%.</i>
Coefficient de similarité entre cellules (CSCL _{kl})	<i>Un CSCL élevé aura tendance à créer un nombre élevé de cellules, soit être sévère sur la fusion de cellule. L'inverse mènera à une configuration avec un faible nombre de cellules (fusion de cellules élevée) ou encore aura tendance à former le nombre minimal de cellules indiqué comme paramètre.</i>
Disponibilité globale du système (heures/semaine)	<i>Le fait d'accroître le nombre de quarts de travail par jour aura un effet positif sur le coût de l'investissement, car la demande pourra être comblée avec moins de processeurs (machines).</i>
Espace disponible (m ²) par cellule	<i>En limitant l'espace disponible, l'heuristique tendra vers une solution où le nombre de machines par cellule sera faible et privilégiera les machines les plus petites. Cela aura tendance à accroître le nombre de cellules.</i>
Type de système de manutention	<i>D'une manière un peu plus implicite, le changement du type de système affecté au transport aura un impact sur les coûts relatifs aux transports intercellulaires qui, dans certains cas, pourrait défavoriser économiquement un SMC avec flux intercellulaire.</i>
Nombre minimal de cellules	<i>Imposer un nombre de cellules élevé forcera l'heuristique former ce nombre si les autres paramètres lui permet. À l'inverse, un faible nombre désengage cette contrainte et laisse plus de latitude à l'heuristique.</i>
Limite de capital disponible (\$\$\$)	<i>Le fait de diminuer le capital poussera l'heuristique à choisir les machines avec un faible prix d'achat, mais dont la durée de vie, la fiabilité et la performance seront négligées. À l'étape de simulation, les performances du système global en seront affectées.</i>

Sachant que la première phase peut générer des scénarios de base de quatre types possibles, le concepteur peut prendre plusieurs orientations de recherche en tirant profit de ces informations. Cependant, le concepteur doit être conscient des limites que l'environnement de production lui impose et des limites économiques du projet, car les scénarios devront être générés en respectant les contraintes et les critères stratégiques de l'entreprise, fixés *a priori*. Ces critères stratégiques pourraient faire partie des paramètres de production déjà cités ou d'autres variables spécifiques à la production. Par exemple, faire varier le nombre de quarts de travail par jour (la capacité disponible quotidienne) constituerait une stratégie de conception, ce qui aurait un impact sur le nombre de processeurs nécessaires.

D'autres parts, le concepteur doit être conscient des désavantages d'une configuration de cellules autonomes qui se verront par un taux moyen d'utilisation des machines très faible résultant en un coût très élevé de l'aménagement. Ce fait valide bien la raison d'être de la deuxième partie de l'heuristique, soit l'élimination des machines les plus coûteuses (les moins exploitées) avec l'aide de l'insertion du flux intercellulaire. En effet, l'autonomie des cellules ne se fait pas sans avoir des processeurs dont leur taux d'utilisation risque d'être très faible. Souvent, on retrouve quelques pièces dont certaines de leurs opérations demandent des machines plus spécialisées ou moins polyvalentes par rapport aux autres de la cellule. L'heuristique recherchera les processeurs dont le taux d'utilisation est inférieur au taux d'utilisation minimal fixé par le concepteur et tentera de les éliminer séquentiellement. Cette option de stratégie sera valide en autant que les coûts supplémentaires occasionnés par le système de transport ne dépassent pas le gain économique dû à la diminution de machines.

Comme dernière stratégie de conception, le type de conception dite pièces-clés a comme spécificité de dédier à une cellule une pièce demandant un traitement spécial ou devant être isolée d'autres pièces. Par exemple, il pourrait s'agir d'une opération particulière nécessitant une machine spécialisée qui doit être isolée des autres processeurs. On

pourrait penser à une machine vibrante qui serait utilisée pour un seul produit et qui ne devrait pas être située à côté d'un poste de calibrage au laser. Le concept prend en considération que le concepteur possède une bonne connaissance des procédés de fabrication. Ce dernier peut aussi recourir à la matrice de résultats du regroupement de cellules pour analyser et ensuite imposer aux cellules les pièces qu'il juge problématique. Cette dernière stratégie a été appliquée au chapitre 5 lors du cas d'application.

2.3 Technique de modélisation

Pritsker et O'Reilly (chap.3, 1999) recommandent six étapes principales à faire pour bien réaliser un projet de simulation : 1) la formulation du problème, 2) la spécification du problème, 3) la construction du modèle, 4) la validation du modèle, 5) l'utilisation du modèle et 6) la prise de décision avec l'analyse des résultats. Pour développer notre modèle, les 5 premières étapes ont été empruntées car la prise de décision relève de l'analyse multicritère.

La première étape consiste à formuler le problème pour bien comprendre le contexte, de bien identifier le ou les buts du projet, de définir les mesures de performance recherchées et de définir les composantes du système qui seront à modéliser de manière à fixer les limites de la modélisation. La spécification du problème comporte deux méthodes utilisées simultanément pour décrire plus précisément ce qui sera à modéliser. La première comporte l'illustration du processus du système et la deuxième crée une liste complète des variables et des paramètres du système. Par exemple, les caractéristiques de base du système, les conditions limites et les hypothèses, les séquences d'opérations, les politiques de gestion de production ou de maintenance, et l'énumération des variables d'entrée au modèle. La construction du modèle est une phase itérative d'amélioration qui comprend la collecte de données, la modélisation et la définition des éléments de contrôle de la simulation. Lorsqu'une version du modèle est

érigée, la validation du modèle se fait aussi de façon itérative par l'essai du modèle et la vérification de la concordance de ses résultats avec les objectifs formulés. Une fois l'obtention d'un modèle fiable, l'exploitation du modèle peut être faite pour l'extraction des critères de performance choisis.

Néanmoins, la phase de modélisation requiert un langage de modélisation flexible qui permettra d'ériger une structure générale de simulation pouvant interpréter plusieurs scénarios de SMC. La stratégie de modélisation proposée ici est inspirée de la méthodologie de programmation avec sous-réseaux du langage *Visual Slam* (Figures 2.3 et 2.4). Ce type de modélisation est basé sur le paradigme de la programmation orientée objet. L'avantage de ce type de modélisation est qu'il permet de développer des objets qui peuvent être repris ou encore invoqués par différentes instances. Pritsker et O'Reilly (chap.8, 1999) présente l'utilisation des sous-réseaux pour un petit exemple d'atelier de production où un seul sous-réseau est exploité pour représenter tous les types d'atelier. Ces derniers ont tiré profit de cette structure simple de modélisation pour créer sous forme d'instance chacun des ateliers du système de production. Cette méthodologie a été empruntée pour développer un modèle général de simulation beaucoup plus exhaustif représentant chaque cellule avec un sous-réseau et tous les types de processeur avec les instances.

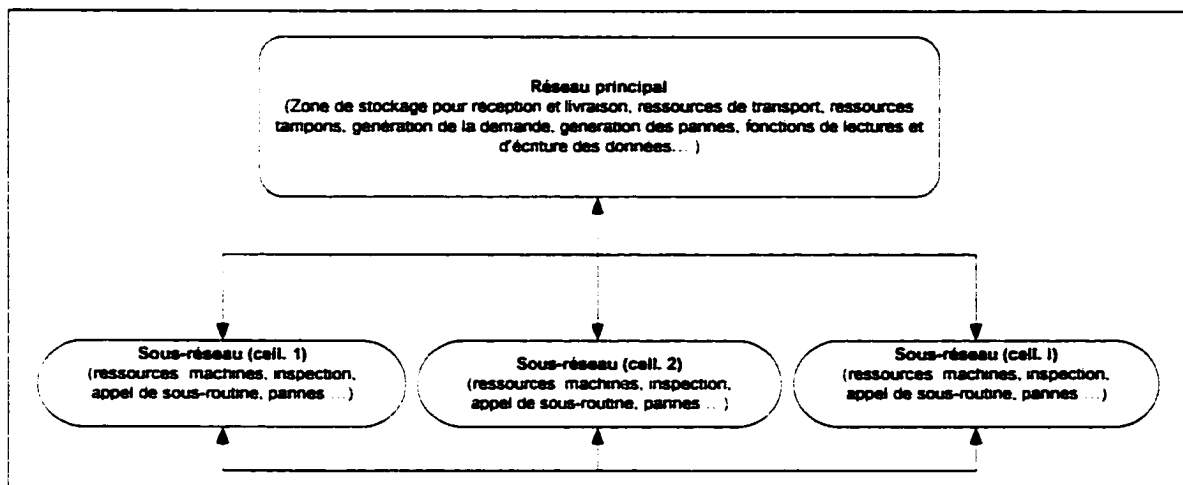


Figure 8 Structure de modélisation avec les paramètres et variables.

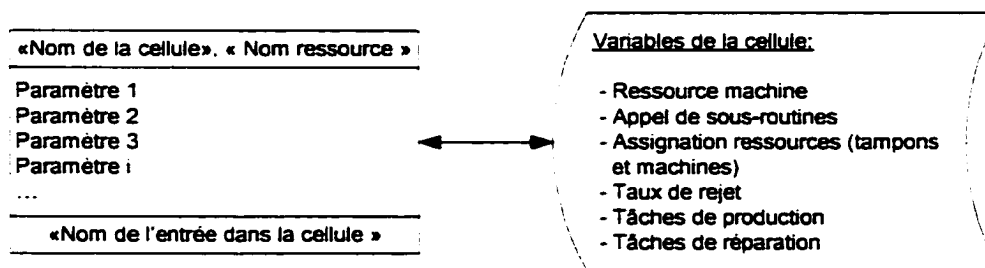


Figure 9 Nœud de sous-réseau appelant des variables

En termes de modélisation, l'instance est définie ici par l'utilisation d'un objet commun pour représenter une activité précise ou encore un objet particulier comme les ressources d'une cellule. Par exemple, la représentation d'un processeur dans une cellule pourra être faite par l'appel du sous-réseau (l'objet) propre à la cellule où l'instance (une utilisation particulière) représentera une ressource en particulier. L'autre avantage qui en découle est que le modèle en sera beaucoup plus allégé car un seul type de processeur est modélisé par cellule. Bref, la structure de modélisation dans ce projet sera composée d'un réseau qui représente le parc cellulaire et de sous-réseaux qui représenteront les cellules. Chacun des sous-réseaux détiendra ses propres attributs, mais aura accès aux variables du réseau maître ou principal.

Les variables utilisées pour représenter les données et les paramètres du système de production sont de plusieurs types. Trois types existent soit les variables locales qui suivront les entités dans le système, les variables globales qui sont uniques dans tout le système et les vecteurs de table de données qui sont aussi des variables globales mais de valeurs réelles. Ces dernières peuvent être vues comme une ligne de matrice avec un nombre indéfini de colonnes. Chaque vecteur peut donc prendre un très grand nombre de données. Cet avantage servira à enregistrer les données relatives à des éléments du système tels les processeurs et les produits et servira donc de base de données de la simulation. Les deux premiers types de variables, quant à eux, pourront être déclarés en nombres réels, en nombres entiers ou encore en chaînes de caractères.

Du côté des informations d'entrée au modèle général, les fichiers de résultats de l'heuristique représentent une source insuffisante de données sur les scénarios à modéliser. Les informations les plus pertinentes retenues à cette fin sont:

- a. le nombre de cellules;
- b. le nom et le nombre des machines par cellule;
- c. la séquence des opérations par produit;
- d. la capacité des machines (taux d'utilisation maximal);
- e. la direction du flux intercellulaire.

Cette dernière énumération montre bien l'insuffisance de ce fichier à fournir des données complètes disposées à alimenter la modélisation ce qui oblige à compléter les informations nécessaires avec l'aide des bases de données initiales de l'heuristique présentées plus haut. Les données suivantes pourront donc être puisées à cet endroit pour compléter les fichiers d'entrée du modèle de simulation.

- a. machines: la grosseur du tampon d'entrée;

- b. procédés: les temps de production et le taux de rejets;
- c. pièces: la demande hebdomadaire.
- d. MTBF et MTTR

Les fichiers de données conçus pour le modèle générale de simulation prendront la forme de fichiers «*.dat ». *Visual Slam* possède l'avantage de détenir des fonctions qui permettent de lire dans les fichiers et d'exploiter les bases de données. Il possède en effet une très grande variété de fonctions qui permet de collecter, représenter, écrire et communiquer avec d'autres applications tel que *MS Excel*.

2.4 Technique de simulation

On a défini à la section précédente les différentes étapes de l'élaboration d'un modèle de simulation sans trop élaborer la cinquième étape. La méthodologie de simulation comprend initialement des étapes intuitives et complémentaires à la construction du modèle. Pritsker et Al (1999) définissent que ces étapes initiales du modèle sont le lancement en mode dynamique, la vérification du modèle, validation du modèle avant de s'en servir définitivement.

On distingue deux types de simulation qui s'apparentent bien à la dynamique des systèmes de production. D'abord, la simulation peut se faire par événements discrets où les événements surviennent au modèle selon un ordre temporel établi dans le temps. Un fichier de données peut être lu à cet effet selon un horizon de simulation désiré. Le deuxième type est la simulation en continu qui est dédiée au système où le débit des informations peut être contrôlé par une équation mathématique. Les deux types peuvent très bien être utilisés dans une même simulation si l'on prend pour exemple un processus de transformation pétrochimique qui nécessiterait d'une part la modélisation du processus en continu, et d'autre part, la modélisation des ressources humaines et des équipements de transport par événements discrets. Par ailleurs, les effets de variation des

événements durant la simulation peuvent être de deux modes : déterministe ou stochastique. L'effet stochastique consiste à lancer une simulation où le calendrier des événements sera sujet à des variations aléatoires souvent représentées (modélisées) par des lois de probabilité. Par exemple, pour une simulation par événements discrets, les entités peuvent être générées par un mécanisme à un temps inter-arrivée variant selon une loi de probabilité propre aux individus du système. Un autre exemple de simulation pourrait être que les produits seraient fournis au système par événements discrets de type déterministe et d'autres événements tels que des pannes ou des commandes non planifiées seraient contrôlées par générateur d'événements discrets de type aléatoires.

Pour les besoins du modèle général développé ici, nous privilégierons une simulation par événements discrets pour sa facilité de modélisation et pour assurer le caractère changeant de la demande, nous appliquerons une distribution de probabilité qui reflète le marché. Gharbi (1992) a exprimé que le rythme auquel les entités pénètrent dans le système dépend directement du temps disponible de production divisé par la demande durant une même période de temps. Ce rythme est représenté par la variable TIA. La période a été fixée pour une durée d'une semaine car l'heuristique exécute ses calculs avec la demande hebdomadaire.

$$TIA = T_{prod} / Demande \quad (2.6)$$

Où :

- TIA : Temps inter-arrivée des produits dans le système.
- T_{prod} : Temps de production disponible par semaine (minutes)
- Demande : Demande hebdomadaire de chaque produit (unités/semaine)

De plus, pour tenir compte du taux de rejet lors de la simulation, la demande T_{prod} doit être augmentée du taux de rejet moyen des produits fourni par l'heuristique à la phase I. L'heuristique fournit un fichier de résultats détenant le taux de rejet pour chaque

opération associé à une machine. La moyenne globale (TMR) peut être ainsi calculée facilement. La transformation de la variable T_{prod} sera faite selon l'équation 2.7.

$$T_{prod} = T_{prod} / (1 - TMR) \quad (2.7)$$

Où :

TMR : Taux de rejet moyen des produits tiré de l'heuristique

Nous avons privilégié de ne pas fixer le mode d'arrivée des entités au système. La demande pourra être de type déterministe ou stochastique selon la volonté du concepteur. Ainsi, le TIA pourra être transformé au besoin par une fonction de probabilité qui reflète la demande. Par exemple, si pour un produit donné, le marché fluctue selon la loi normale de probabilité, une distribution normale de moyenne TIA et d'un écart type de α % du TIA pourrait être ainsi utilisée. Le coefficient « α » serait évalué l'aide des données du marché.

$$TIA = RNORM(TIA, \alpha * TIA) \quad (2.8)$$

La distribution doit bien refléter les fluctuations du marché pour chaque produit. Dans le cas où certains produits posséderaient des fluctuations différentes, plus qu'une distribution devra être utilisée pour différents produits.

2.5 Technique d'analyse multicritère

Après l'extraction des critères de performance, il devient nécessaire de rassembler l'information et de l'analyser afin d'effectuer le meilleur choix de système. L'analyse multicritère AHP (de l'anglais « Analytic Hierarchy Process ») de Saaty (1982) correspond bien au besoin d'analyse de cette dernière phase. Cette méthode possède la force de réunir pour une même décision des critères qualitatifs et des critères quantitatifs. Malgré le fait que les critères qualitatifs proposés dans ce mémoire ne sont

pas utilisés lors de l'application au chapitre 5, l'analyse AHP est recommandée comme outil de synthèse à la dernière étape de la méthodologie de conception.

L'AHP consiste tout d'abord à mettre sous hiérarchie le problème avec les critères de décision qui le régit (Figure 10). Elle se distingue des autres méthodes dans sa façon de déterminer les poids des critères et des alternatives de solutions de SMC. Elle procède par comparaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur. Tous les critères sont comparés deux à deux par rapport à l'objectif global de l'étude ce qui générera le vecteur priorité pour chaque niveau de la hiérarchie.

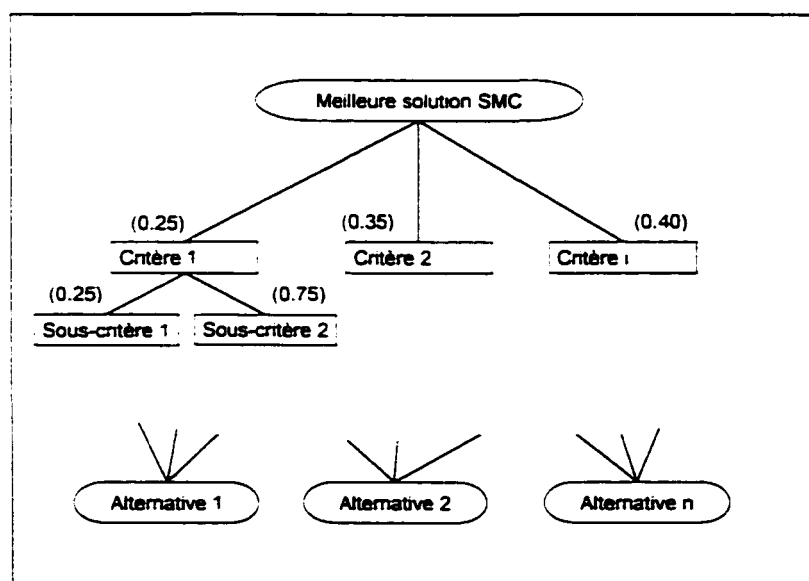


Figure 10 Hiérarchie d'un problème multicritère

Un des avantages de cette méthode est qu'elle peut identifier et prendre en considération les incohérences des décideurs. L'incohérence apparaîtra si les jugements faits lors des comparaisons binaires des critères ou de l'évaluation de critères qualitatifs par rapport

aux alternatives de solutions s'avèrent injustes. Par exemple, si l'on juge le critère A deux (2) fois supérieure au critère B et trois (3) supérieur au critère C; et que l'on avance par la suite que le critère C est deux (2) fois supérieur au critère B. La synthèse de ces jugements fera ressortir de l'incohérence car l'évaluation de C par rapport à B était injuste. Dans ce cas, il aurait été logique de juger B d'environ une demie ($\frac{1}{2}$) fois supérieure à C. Selon Saaty (1982), le ratio de cohérence doit être inférieur à 10% pour qu'une prise de décision ne soit pas erronée. Ce dernier a élaboré une échelle où des indices aléatoires RI furent établis en effectuant des jugements aléatoires pour un nombre élevé de répliques. Ainsi, à l'aide de ce facteur, le ratio d'incohérence du décideur peut être calculé et jugé s'il est acceptable ou non. L'outil proposé dans ce mémoire calcul ce ratio pour chaque série de pondérations qualitatives. Pour faciliter ces calculs et l'analyse, le logiciel « *Expert Choice* » sera intégré à la démarche et permettra de mettre en graphique les résultats. Enfin, pour renforcer la décision finale, une analyse de sensibilité est intégrée à la fin de cette dernière phase. L'analyse de sensibilité permet de valider l'effet de la variation des poids des critères principaux sur le résultat final. Cette analyse permet de vérifier si la décision du concepteur changerait dans le cas où ce dernier diminuerait l'importance d'un ou plusieurs critères dominants par rapport aux autres. Cette technique permet d'informer le concepteur sur l'éventualité d'écarter une bonne solution et de prévoir quelle sera la nouvelle solution si la priorité des critères évolue pour l'entreprise.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les méthodes que l'on propose dans le cadre du modèle général de conception de SMC ont été décrites. L'heuristique de formation de cellules a été présentée avec son mécanisme et la façon dont elle doit être exploitée au niveau stratégique. Les types de scénarios potentiels et les paramètres de conception ont aussi été présentés. Les techniques de modélisation et de simulation ont été discutées selon les stratégies que nous préconisons pour représenter généralement des scénarios de

système manufacturier cellulaire. Enfin, pour tenir compte de toutes les informations de types quantitatifs ou qualitatifs relatives à chacun des critères de décision, l'utilité de la technique d'analyse multicritère AHP fut démontrée.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION ET SIMULATION

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle général de simulation qui permettra de simuler plusieurs scénarios de SMC. Le modèle a été développé en cherchant à minimiser les changements à apporter pour chaque nouvelle simulation. Les sections suivantes incluent respectivement les étapes traditionnelles de développement d'un modèle général de simulation avec la formulation du problème, les spécifications du système à modéliser et une description du modèle de simulation. Nous verrons que ce modèle peut autant être de type hybride que de type uniquement cellulaire grâce à l'utilisation des sous-réseaux. Pour une meilleure compréhension des termes employés, l'emploi du mot «machine» signifiera autant une ressource d'un poste de travail qu'un processeur de tâches de type robot-machine.

3.2 Description du cas général de modélisation d'un SMC.

À partir des fichiers de scénarios générés avec le logiciel de formation de cellules, il faut définir comment cette information passe au modèle général de simulation. En d'autres mots, vu que le modèle a été développé de façon générale, seule l'information des fichiers de données changera et sera fournie au modèle sous forme de paramètres et de fichiers. Tel que mentionné déjà, le modèle général de simulation de SMC a été conçu à l'aide du langage *Visual Slam*, Pritsker (1999). Le modèle fut développé selon les règles de l'art établi pour ce langage. Selon Pritsker et O'Reilly (chap. 3, 1999), le processus de modélisation et de simulation focalise sur la formulation et la résolution d'un problème. De plus, la modélisation prendra forme avec l'addition d'informations clés telles des actions importantes et des événements reliés au problème analysé. Elle s'arrêtera lorsque les détails additionnels n'apporteront plus rien à la résolution du problème. Tous ces

éléments du modèle doivent être définis en fonction des mesures de performance recherchées.

3.2.1 Formulation du problème

Contrairement à la plupart des projets de modélisation, le présent cas ne cherche pas à étudier une particularité d'un système. Il vise plutôt à utiliser la simulation pour en extraire les données des critères de performance définis pour comparer les scénarios. Il va de soi qu'un trop grand nombre de critères viendra alourdir l'analyse et la prise de décision et donc, qu'un nombre limité d'entre eux doit être fixé. Pour ce, nous nous en remettons à l'analyse AHP pour préciser lesquelles des caractéristiques de performance auront effet sur le choix du système. Ces données s'ajouteront ainsi aux autres variables de décision de l'analyse multicritère (Chapitre 4).

D'autre part, il est important de noter que le système manufacturier cellulaire est en flux tiré. Or, un tel type de gestion a pour but de minimiser les encours, ce qui concorde avec un des avantages d'un SMC. Pour mettre en œuvre un système en flux tiré, il faudra éviter de libérer un processeur si le tampon relatif à la prochaine opération est plein. Une telle action aura pour effet de retenir en amont les stocks pour éviter une multiplication des goulots ou encore éviter un taux de production trop élevé chez les postes de travail les plus performants. Par conséquent, le modèle de simulation devra tenir compte de ce facteur en insérant des éléments de contrôle.

3.2.2 Spécification du système manufacturier

Au chapitre de la méthodologie, nous avons discuté des étapes recommandées d'un projet de modélisation. Les deux parties de la phase de spécification du problème sont présentées ici. Pour faciliter la présentation et conceptualiser le SMC, la figure 11 présente le cheminement que prennent les entités dans le système.

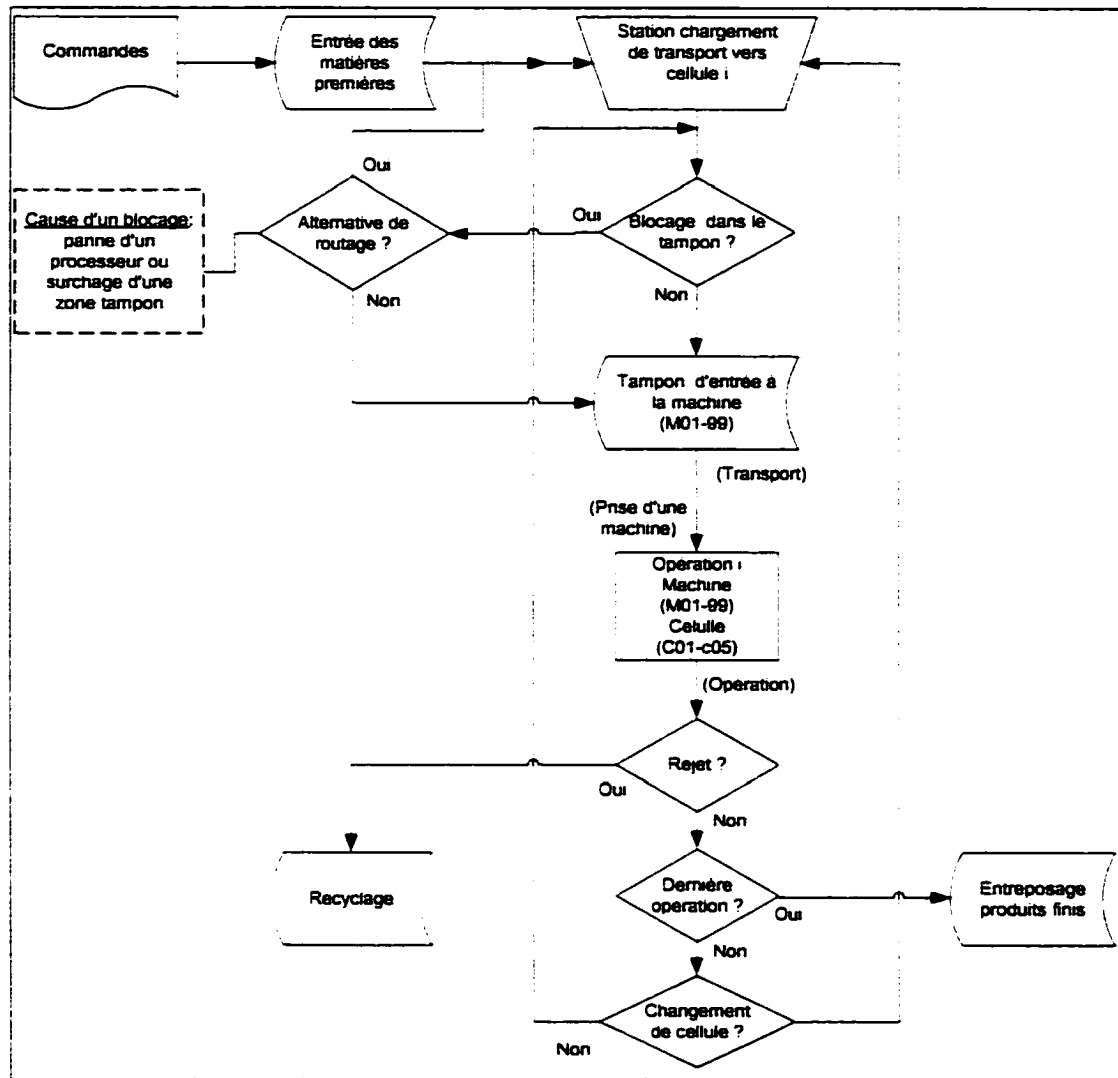


Figure 11 Diagramme de déroulement des produits dans le SMC

Le cheminement des matières se décrit comme suit. Toutes les réceptions de matières premières sont centralisées en un point. La matière à transformer est ensuite transportée au tampon d'entrée d'une machine de type Mxx (où « xx » peut être {01, ..., 10}) pour la première opération. Pour chaque opération de fabrication, s'il y a surplus de stocks au tampon, la pièce est acheminée si possible à un autre processeur pour l'opération donnée. Dès qu'il y a une machine du type Mxx disponible, l'opération est effectuée, s'il

Y a rejet, la pièce est envoyée au recyclage des métaux sinon elle est envoyée au tampon de l'opération suivante. Dans le cas où l'opération devrait être faite dans une autre cellule, la pièce est prise en charge par une ressource de transport pour être acheminée à la bonne cellule. Ainsi, seuls les transports intercellulaires ont été modélisés.

Pour obtenir une simulation efficace, des conditions limites doivent être définies afin d'éliminer des variables ou des facteurs jugés négligeables ou encore qui auraient pour conséquence d'alourdir la modélisation. Par exemple, les produits seront considérés de priorité égale car l'heuristique de formation de cellules ne tient pas en compte les dates de livraison et l'importance d'un client par rapport à un autre. De plus, la séquence initiale de routage des opérations pourra être changée selon certaines conditions et politiques préétablies ce qui permettra la flexibilité de choix de processeur.

Les caractéristiques de base du modèle sont :

- a. le modèle peut composer un aménagement allant jusqu'à dix (10) cellules;
- b. les ressources sont de trois sortes : transport, tampon et processeur;
- c. chaque cellule peut posséder jusqu'à un maximum de dix (10) types de processeurs de capacité illimitée (nombre d'unité);
- d. la limite de type de produits est fixée 99;
- e. chaque type de produits peut avoir une séquence d'au plus de 8 opérations;
- f. les opérations requièrent un seul processeur à la fois;
- g. les opérations sont exécutées une à la fois et les temps de mise en course sont inclus dans le temps de traitement;
- h. toutes les données sont lues initialement en lançant la simulation.

Les conditions limites et hypothèses établies pour le modèle sont:

- a. la durée de la simulation a été fixée à 1 an de production afin d'avoir un nombre suffisant de données;
- b. la capacité d'un type de ressources est représentée par son nombre d'unités;
- c. le taux de rejet est relatif au processeur et non à l'opération;
- d. le temps inter-arrivée est établi selon la formule du TIA et, s'il y a lieu, il sera sujet à des fluctuations calculées à partir d'une fonction de probabilité;
- e. les opérations ne comprennent aucune tâche d'assemblage;
- f. chaque pièce est traitée une à la fois;
- g. s'il y a blocage ou surplus dans un tampon, un processus de flexibilité de routage est exécuté;
- h. les transports intracellulaires sont négligés et donc, pas modélisés;
- i. les temps morts dus au changement de quarts de travail et les pauses ne seront pas pris en compte;
- j. le modèle ne prend pas en compte les dates de livraison.

Les données d'entrée et de sortie du modèle:

De façon à mieux visualiser les principaux éléments d'entrée et de sortie du système que représente la simulation, le Tableau III résume l'essentiel de ces données. Ces dernières sont celles que l'utilisateur du modèle général d'un SMC aura à fournir à l'entrée et qu'il pourra obtenir en informations de sortie de la simulation.

Tableau III

Liste des informations de la simulation

Informations d'entrée	Informations de sortie
<u>Système général :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Nombre de cellules - Le fréquence des pannes - Le type de fluctuation de la demande - Distances entre les cellules (temps) <u>Pièces (entités du système) :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Types de produits - Demande hebdomadaire / produit - Séquences d'opérations / produit / cellule - Flexibilité de routage des opérations - Temps de production / opération / processeur <u>Pour les ressources (processeurs, tampons...):</u> <ul style="list-style-type: none"> - Types de processeurs - Nombre de processeurs de type « n » / cellule - Taux de rejet / machine - Capacité du tampon / type de processeurs - Capacité de la ressource de transport 	<u>Système général :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Temps moyen dans le système - Nombre moyen d'encours (WIP) - Cadence moyenne de production <u>Pour les pièces :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Temps moyen dans le système / produit - Taux moyen de pièces rejetées <u>Pour les ressources (processeurs, tampons...):</u> <ul style="list-style-type: none"> - Taux d'occupation des processeurs - Temps moyen d'attente à l'entrée des processeurs - Temps de transport cumulé - Taux d'occupation des tampons

3.3 Description du modèle

Tel que déjà cité auparavant, le modèle de simulation développé dans ce mémoire cherche à représenter un système manufacturier cellulaire général. Ce dernier prendra sa forme particulière lors de la lecture des fichiers de données et des paramètres ajustés par l'utilisateur. Le modèle fut développé en utilisant le logiciel *AweSim 3.0*, assisté du compilateur *Microsoft Visual C++*. Une description détaillée du modèle est disponible à

l'annexe 3. Comme nous le verrons plus loin, l'avantage de ce modèle est qu'il peut être réutilisé pour diverses configurations de SMC avec un minimum de modifications à y apporter.

Le modèle de simulation comprend sept (7) composantes principales qui sont le fichier de contrôle, le fichier du réseau principal et les cinq (5) fichiers de sous-réseaux représentant les cellules. À cela viennent s'ajouter les fichiers de données servant à alimenter la base de données et un fichier de sous-routines en langage C pour l'exécution de procédure de décision pour des événements spécifiques que l'on verra plus loin. La simulation sera faite par événements discrets, car il serait beaucoup trop complexe d'établir des équations mathématiques représentant le comportement en continu de tout le SMC. De plus, ne détenant aucune connaissance du comportement dynamique du système à simuler, nous ne pouvons élaborer de façon exacte la modélisation en continu. Ainsi, l'exécution de la simulation est faite selon un ordre d'activités prédéfini par le modèle. Lorsque les entités (les produits) circulent dans le modèle (le système), le temps avance successivement au rythme que les activités sont prescrites pour la production.

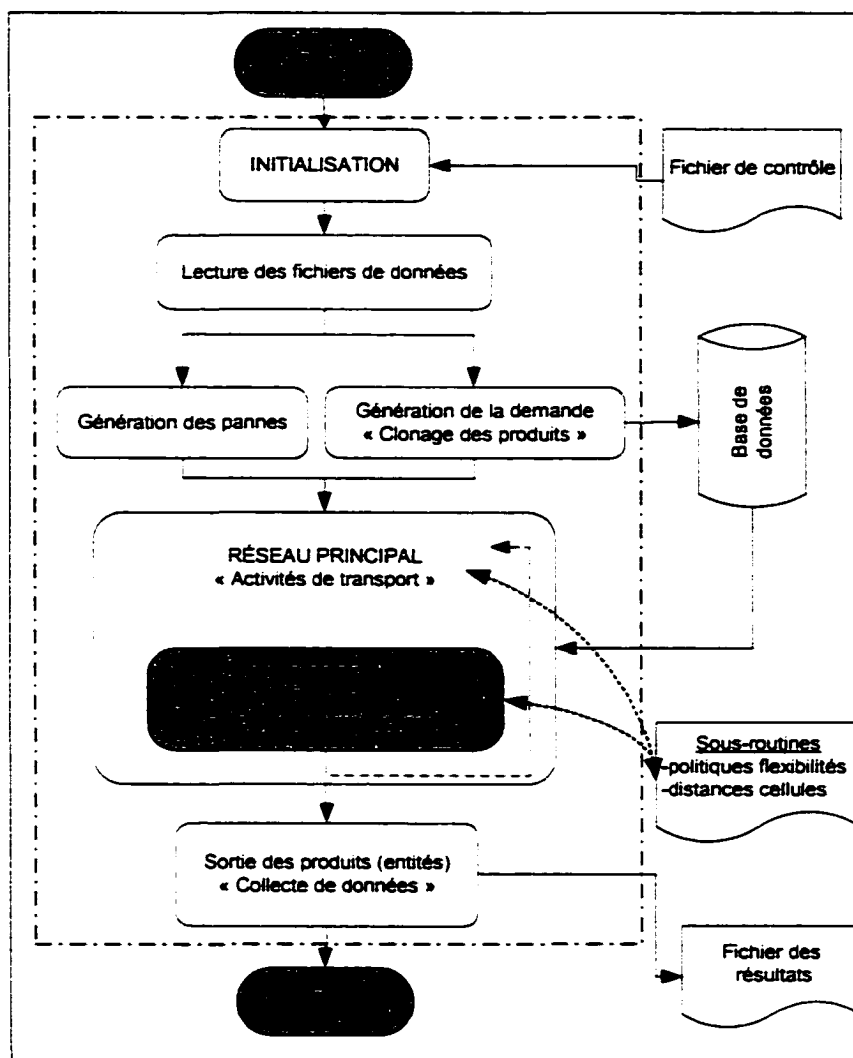


Figure 12 Diagramme des composants du modèle de simulation

La figure 12 illustre globalement le modèle général avec ses composantes et les étapes principales du déroulement de la simulation. Le système de simulation débute par l'initialisation des paramètres et des variables suivis de la lecture des fichiers nécessaires à la base de données. Ensuite, deux activités sont faites en parallèle pour, d'une part, générer les pannes aléatoires et, d'autre part, générer la demande des produits. Une fois la demande générée, les entités pénètrent dans le réseau principal pour prendre la direction des cellules de production modélisées par les sous-réseaux. Après les

séquences de production complétées, une activité de collecte de données s'exécute avant de faire sortir les entités du système.

3.3.1 Initialisation

L'initialisation consiste à mettre à zéro et à déclarer les paramètres et variables qui seront utilisés durant la simulation. Le fichier de contrôle, disponible en annexe, contient toutes les instructions pour accomplir cette tâche. Il déclare le nombre et le genre de variables qui seront utilisées. L'établissement des noms de variables sous forme d'équivalence suit cette procédure. Le fichier de contrôle est responsable de créer la base de données référentielle sous forme de vecteurs où leur indice et leur grandeur sont spécifiés. De plus, ce fichier permet d'établir les collectes d'informations spécifiques recherchées pour l'analyse du système modélisé. Enfin, l'établissement des limites du temps de simulation, soit le début et la fin, y sont fixées avant d'exécuter le fichier de réseaux.

3.3.2 Lecture des fichiers de données

La deuxième composante du modèle comporte un réseau qui effectue la lecture de tous les fichiers servant à alimenter la base de données du modèle et les valeurs initiales des variables locales propres aux produits. Le processus de lecture s'effectue dès le déclenchement de la simulation par le fichier de contrôle. Une lecture séquentielle des fichiers de données est faite et les données sont enregistrées dans la base de données du simulateur. L'ordre de lecture et les variables relatives aux fichiers sont illustrés à la figure 13. Le réseau a été modélisé de manière à lire un nombre variable de types de produits. Ce nombre est limité à 99. Ainsi, peu importe le nombre de pièces différentes, un processus de décision mis en place permet de détecter la fin du fichier.

Tableau IV

Liste des variables et indices du modèle de simulation.

Indices

i	: Numéro du produit
j	: Numéro de l'opération de la séquence de fabrication d'un produit {1,....,8}
k	: Rang du processeur dans une cellule {1,....,10}
x	: Numéro de la cellule {1,....,5}
y	: Numéro de la cellule de la prochaine opération {1,....,5}

Variables

Alt1 _{ij}	: Alternative #1 de routage pour l'opération j du produit i
Alt2 _{ij}	: Alternative #2 de routage pour l'opération j du produit i
D _{xy}	: Temps de transport entre les cellules x et y
DEMPROD _i	: Demande hebdomadaire du produit i
ETYPE	: Variable du numéro du produit (ou le numéro de processeur pour les pannes)
MACH _{ij}	: Nom du processeur de l'opération j du produit i
Mcap _{kx}	: Capacité du processeur ou de la machine k dans la cellule x
OP _{ij}	: Opération j du produit i
Rejet _{kx}	: Taux de rejet du processeur ou de la machine k
TCap _{kx}	: Capacité du tampon du processeur k dans la cellule x
TEMPOP _{ijk}	: Temps de l'opération j du produit i sur le processeur k
TIA _i	: Temps inter-arrivée du produit i
TOP _{ijk}	: Temps de l'opération j du produit i, alternative de routage - machine k
TNOW	: Temps instantanés durant la simulation
TYPEPROD	: Nom du produit

Paramètres

Tdébut	: Temps de début d'un événement
TPmoy	: Temps moyen de panne
WIP	: Taux d'encours courant dans le système

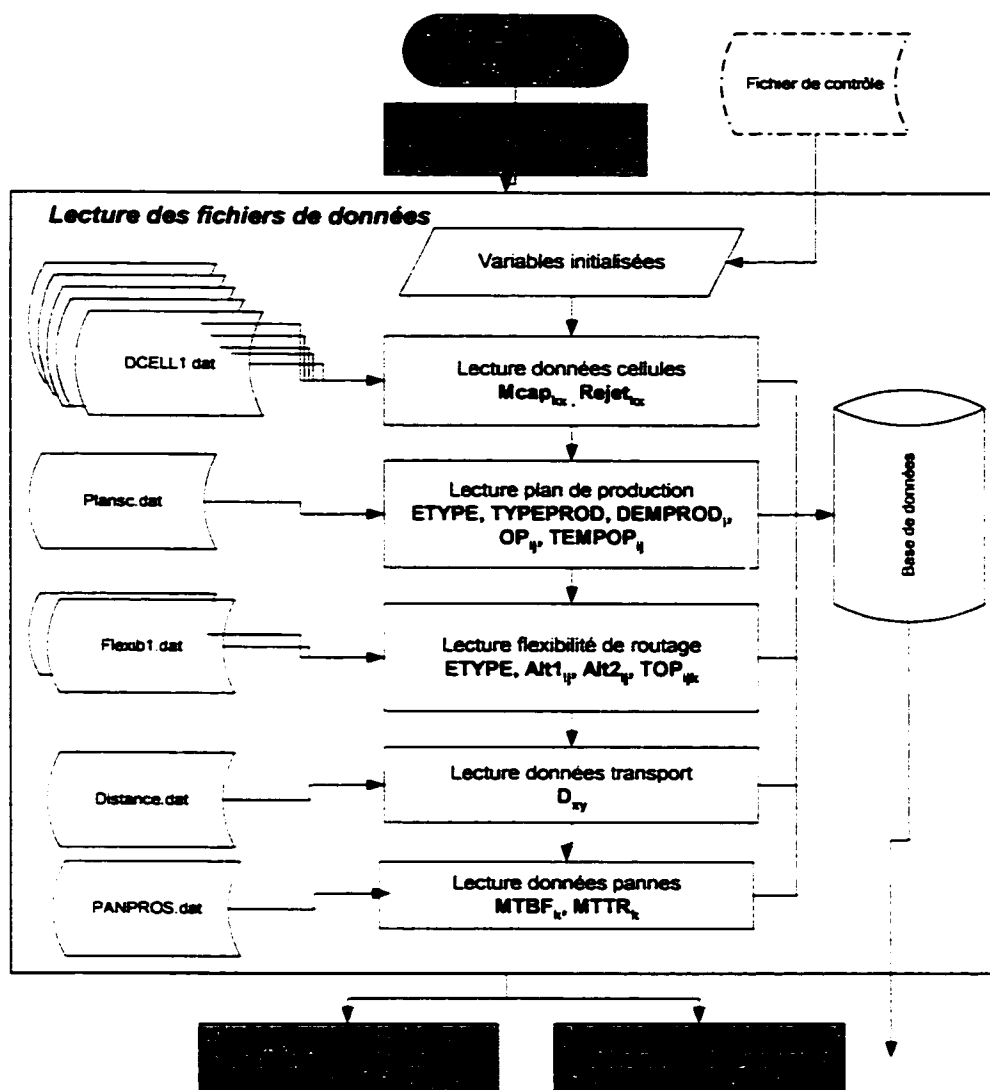


Figure 13 Diagramme des lectures de fichiers de données

3.3.3 Génération des pannes

Afin de créer un effet de pannes selon des intervalles de temps réalistes, un réseau indépendant génère les pannes selon le temps moyen de panne (MTBF) de chaque processeur (Figure 14). Le MTBF et le temps moyen de réparation (MTTR) sont lus initialement dans un fichier de données. Lors de la lecture de données, le modèle génère autant d'entités (pannes) que de types de processeur. Ensuite, les entités créées entreront

dans un mécanisme de clonage qui reproduira au rythme du $MTBF_k$ du processeur « k » qu'il représente. On appliquera la fonction de distribution relative au type de machine afin de mieux représenter l'effet stochastique des pannes. Pour les besoins d'application du cas traité au chapitre 5, on a employé une fonction log normale pour représenter cet effet de fluctuation où la moyenne sera égale au MTBF et l'écart type sera égal à α % de la moyenne. Ce dernier pourcentage sera ajusté selon le type d'équipements requis dans le scénario de SMC.

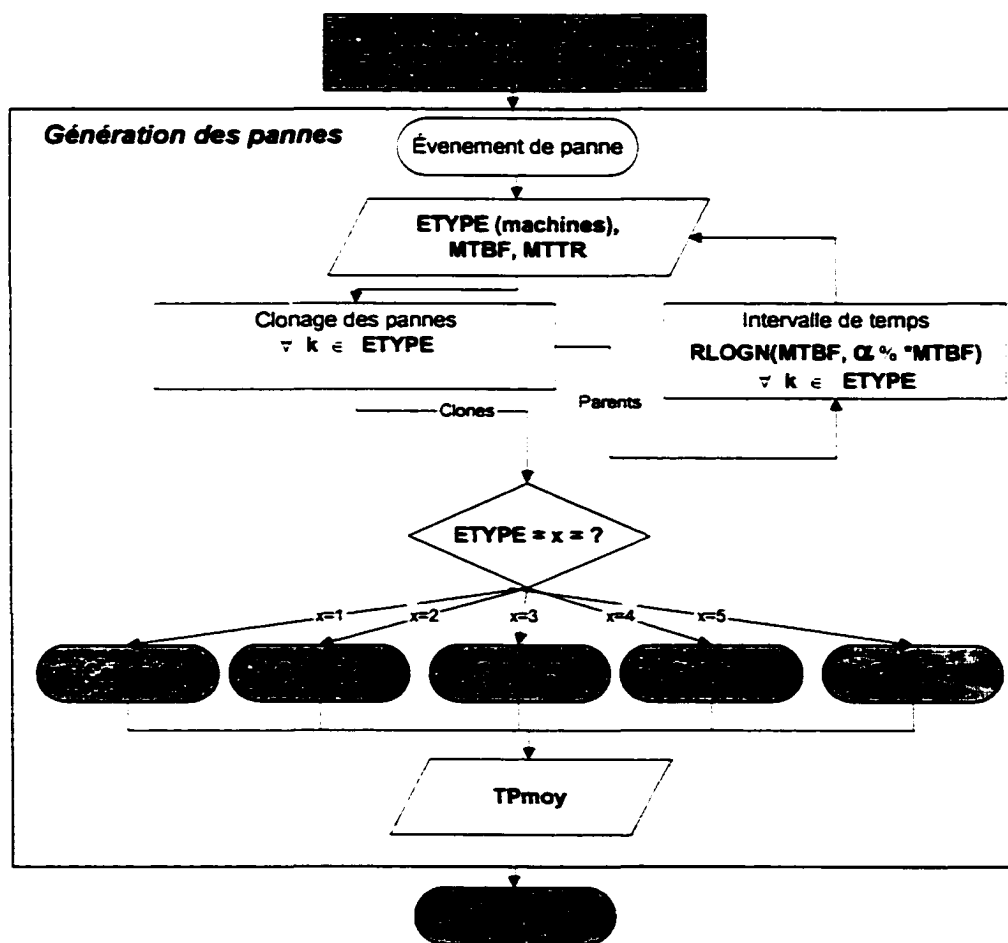


Figure 14 Génération des pannes des processeurs

Ainsi, lorsque l'entité pénètre dans le système pour réquisitionner aléatoirement une machine du système, on interprète celle-ci comme une panne qui prive momentanément

le système de production d'une ressource, même si cette dernière était occupée à une tâche. Les valeurs des MTBF et MTTR de la base de données de l'heuristique de formation de cellules ont été employées pour créer le fichier de données de pannes. La durée de réparation de chaque panne (MTTR) a aussi été modifiée par une fonction de distribution. Après chaque réparation, le temps de panne est enregistré pour obtenir le temps moyen de réparation comme caractéristique du système.

3.3.4 Génération de la demande

La génération de la demande est faite à l'aide des données du fichier du plan de production initial (Figure 15). Pour chaque produit, une demande hebdomadaire est détenue dans la base de données. Tel que vu au chapitre 2, les produits sont insérés au système avec un temps inter-arrivée calculé à l'aide de la formule 2.1 du TIA. On impose ensuite à cette variable une fluctuation selon une loi de probabilités qui correspond aux fluctuations de la demande des produits. Pour la présente application, nous considérerons une loi normale de moyenne équivalente au TIA et d'écart type de α % du TIA. Cette écart-type sera aussi évalué à l'aide des prévisions du marché.

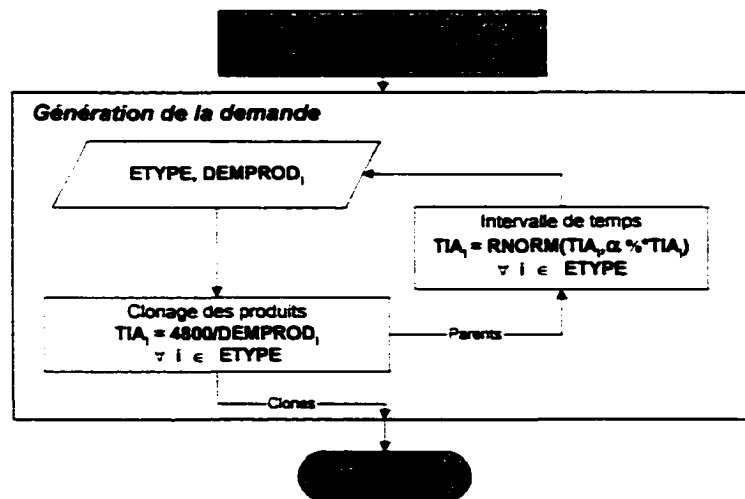


Figure 15 Boucle de génération de la demande des produits

Le processus de clonage est simple. La première unité de chaque produit entre dans une boucle infinie où chaque clone qu'elle créera, à son propre rythme (TIA_i), quittera le générateur avec ses attributs.

3.3.5 Le réseau principal

Après avoir généré la demande et les pannes, les activités de production débutent dans le réseau principal (Figure 16). C'est à cet endroit du modèle que sont déclarées les ressources de transport et les ressources tampons propres à chaque type de processeur des cellules. Après avoir été cloné, le produit indique son temps d'entrée ($T_{début}$), l'indice du numéro de séquence égale à 1 et incrémente de 1 les encours ($WIP + 1$). Par la suite, un processus de décision vérifie si le tampon de la machine de l'opération courante est plein. Dans l'affirmatif, l'entité simulant la pièce entre dans la sous-routine #2 pour vérifier quelle est la meilleure alternative de routage disponible selon les règles de décision choisies pour le présent scénario. Une fois l'alternative de routage choisie, l'entité réquisitionne une ressource de transport qui l'amènera à sa cellule de production respective. Le processus de décision pour le choix de la bonne cellule prend en référence l'indice « x » du code de l'opération OP_{ij} qui est codé en spécifiant à la fois le numéro de la machine et le numéro de la cellule (voir en annexe, la description détaillée du modèle). Une fois la ressource de transport libérée, le produit entre dans le sous-réseau simulant la cellule pour effectuer la tâche de production OP_{ij} . Si toutes les opérations du produit sont complétées dans la cellule, le produit fini sortira de la cellule et sera acheminé au processus de collecte de données ; sinon, il nécessitera un flux intercellulaire où la sous-routine de décision #3 sera interpellée pour spécifier le bon temps de transport vers la nouvelle cellule. Pour ce dernier cas, l'entité réquisitionne à nouveau une ressource de transport pour la durée spécifiée dans D_{xy} . Enfin, à noter que le temps de transport entre l'entrée au système et la première cellule a été jugée négligeable d'où la raison à laquelle on fixe D_{xy} égale à zéro à l'entrée des produits.

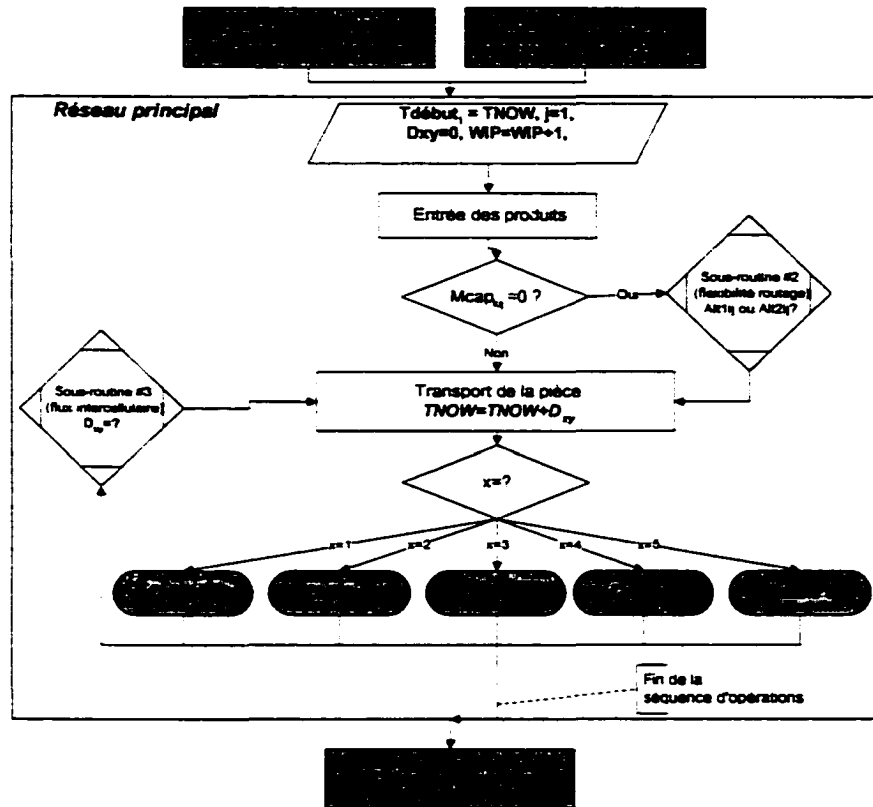


Figure 16 Réseau principal du modèle de simulation

3.3.6 Les sous-réseaux

La figure 17 illustre un des sous-réseaux qui représentent les cellules de production et son processus. Chacun des sous-réseaux possède ses processeurs qui peuvent être imaginés comme des postes de travail ou des machines.

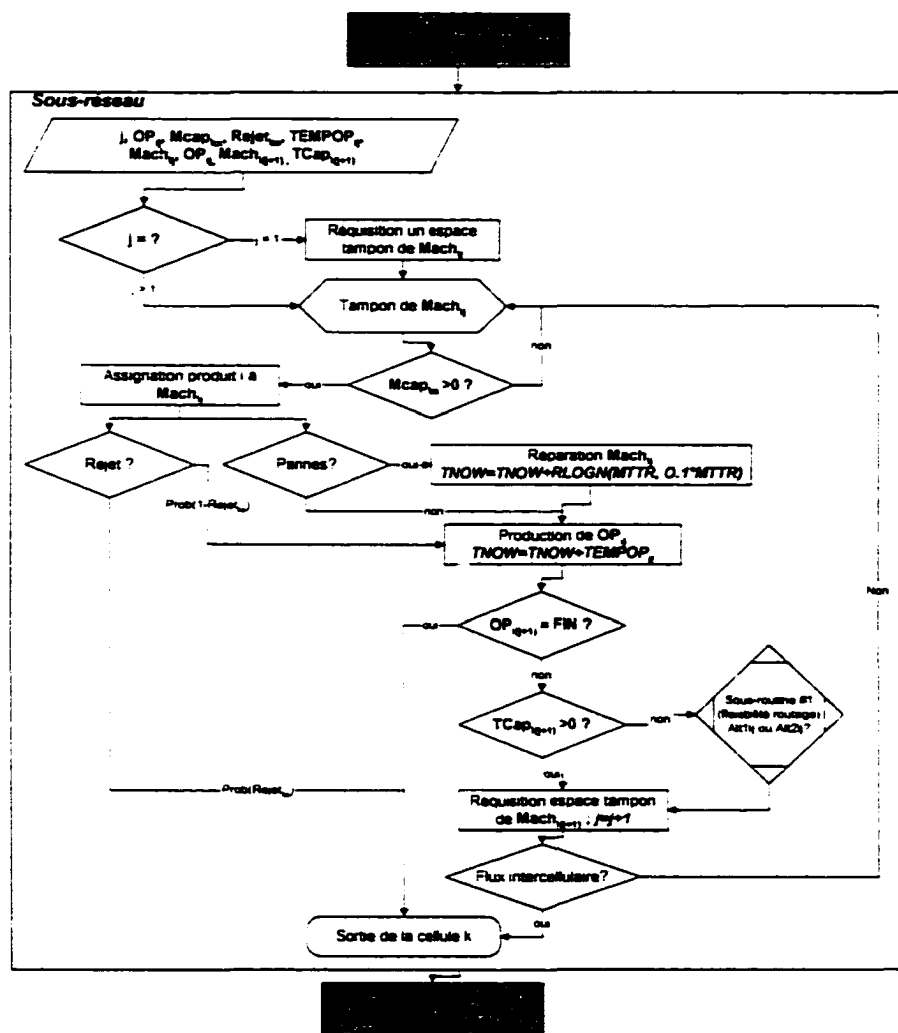


Figure 17 Schéma d'un sous-réseau du modèle de simulation

À chaque passage dans une cellule, le produit (l'entité) passe avec lui les paramètres de production tels le temps de production de l'opération courante et de même que la capacité, le numéro et le taux de rejet du processeur dédié. Pour la première opération de sa séquence, le produit entre dans le tampon afin d'attendre qu'une machine se libère. Une fois la machine requise libérée et assignée au produit, l'opération est exécutée. Deux événements peuvent venir empêcher l'achèvement de l'opération. Le premier est le risque de rejet d'une pièce non conforme selon une probabilité proportionnelle au taux

de rejet de la machine. Dans ce cas, la machine est libérée et la pièce (ou le produit) est retirée de sa cellule et envoyée à la collecte de données. Le deuxième événement survient quand une des pannes générées correspond à la machine en cours d'utilisation. La panne survenue interrompra la production de la pièce pour une période de réparation définie par le MTTR de la machine. On imposera une fluctuation au MTTR selon une distribution logarithmique normale qui montre pour notre cas une représentation réaliste de la durée des pannes de machine. Une fois l'opération complétée, deux processus de décision valident s'il y a d'autres opérations et si le tampon de l'opération suivante est plein. S'il s'agit de la dernière opération, l'entité est dirigée vers la sortie de la cellule. Dans le cas où le tampon suivant serait plein, la pièce est conservée sur la machine et la sous-routine #1 recherche une alternative de routage. Une fois l'espace d'un tampon d'une autre machine réquisitionné, on valide si l'opération suivante doit être faite dans une autre cellule, sinon la pièce est directement acheminée à son tampon suivant dans la même cellule.

3.3.7 Collectes des données et fin de la simulation

La dernière étape de la simulation, une étape très importante, est la collecte de données pour les diverses caractéristiques du système telles les indices de performance recherchés pour l'analyse AHP, la durée du temps de la simulation ou encore les valeurs sommaires de certaines variables du modèle. Pour exécuter cette étape, le fichier de contrôle détient les instructions relatives aux statistiques recherchées. Ce fichier se chargera de combiner les données et de les écrire dans un fichier sommaire.

3.3.8 Sous-routines de décision

Pour obtenir un niveau plus élevé de flexibilité dans la modélisation, le recours à des fichiers de sous-routines écrites en langage C a été fait (voir exemple à l'annexe 2). Un avantage pratique de l'utilisation de routines externes au modèle est que *Visual Slam* possède une panoplie de fonctions prototypes déjà programmées pouvant autant agir sur les entités du système que sur les nœuds ou les ressources. Chaque fichier externe en langage C englobe trois sous-routines de décision. La logique de décision du cas #1 est semblable à celle du cas #2 à l'exception de certaines règles de programmation. En effet, le cas #1 est utilisé par les sous-réseaux pour les cas de goulot d'étranglement alors que le deuxième sert uniquement aux nouveaux produits qui entrent dans le système. Pour le cas #3, une simple règle de recherche des temps de transport dans la base de données fut codée à cette fin. Cette dernière sous-routine demeure la même peu importe la politique de flexibilité de routage choisie (cas #1 et #2).

La flexibilité de routage devient ainsi un outil essentiel pour évaluer divers scénarios. À l'aide de règles d'ordonnancement que l'on programme, on peut vérifier l'effet de plusieurs politiques pour un même scénario avec différents fichiers de sous-routines externes. Pour la présente application présentée au chapitre 5, deux fichiers différents de sous-routines furent écrits en langage C, soit deux politiques de flexibilité composées de deux règles d'ordonnancement chacune. La figure 18 représente la routine logique du cas #1 pour exploiter la flexibilité de routage selon un exemple de politique de flexibilité utilisé lors de l'application de la méthode.

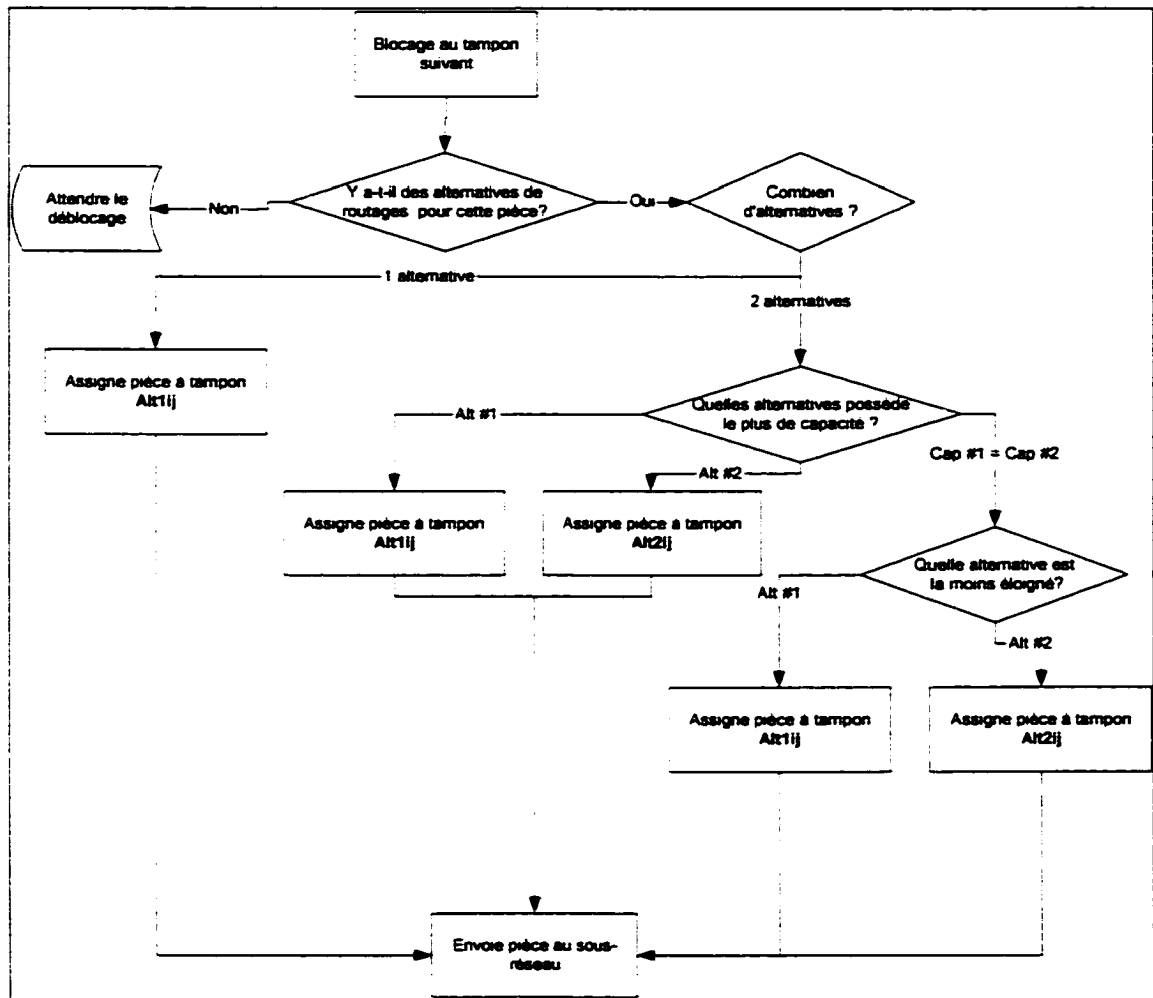


Figure 18 Exemple de sous-routine de flexibilité de routage.

Plusieurs autres règles d'assignation de machine peuvent être écrites à l'aide du code de base de ces sous-routines. Gharbi (1992) a utilisé pour son modèle de simulation d'un atelier flexible plusieurs règles d'ordonnancement. En s'inspirant de ces dernières, on a établi la liste suivante que le modèle général pouvait traiter :

- sélection de l'alternative (processeur) dont la ressource tampon (espace) la plus disponible;
- sélection de l'alternative dont le temps d'opération sera le plus court;
- sélection de l'alternative physiquement la plus proche;

- d. sélection de l'alternative possédant le taux de rejet le plus bas;
- e. sélection de l'alternative possédant le MTBF le plus long;
- f. sélection de l'alternative de processeur possédant la plus grande capacité (nombre d'unités).

3.4 Conclusion

Ce chapitre décrit le modèle de simulation d'un SMC. Avant d'aborder cette description, une revue du fonctionnement de l'heuristique de formation de cellules fut faite. Par la suite, les étapes de conception du modèle furent exposées. Les limites et les hypothèses de ce dernier furent avancées aussi. Enfin, une description de chaque composant du modèle a été complétée. Ces composants sont le fichier de contrôle, le réseau principal, les sous-réseaux et les routines C.

CHAPITRE 4

ANALYSE MULTICRITÈRE

4.1 Introduction

Ce chapitre présente la dernière étape du modèle de conception d'un SMC pour l'analyse multicritère des scénarios antérieurement conçus. La méthode d'analyse proposée est la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) qui établit une hiérarchie de critères de décision et permet la comparaison des critères entre eux. Cette méthode permet l'analyse en profondeur d'une prise de décision qui peut prendre en compte autant le jugement du décideur que la compilation des données quantitatives. Une présentation de chaque critère de sélection est faite de manière à valider leur utilité et démontrer la manière dont la pondération sera effectuée pour chacun d'entre eux. Cette troisième et dernière étape de notre modèle général de conception propose l'utilisation du logiciel *Expert Choice* comme aide à l'analyse.

4.2 Les critères de décision

L'arbre hiérarchique à la figure 19 représente la structure proposée à plusieurs niveaux par l'analyse AHP. On y retrouve également le sigle signifiant la source de données pour la pondération. Cantamessa et Turrone (1997) ont utilisé une telle hiérarchie à trois niveaux de détails pour le choix d'un SMC, c'est-à-dire un niveau de critères, un niveau de sous-critères et un dernier pour les alternatives de solutions (scénarios proposés). On s'est inspiré de ces derniers auteurs pour l'élaboration des critères de décision.

Évidemment, les critères choisis sont possibles si, et seulement si, l'information est facilement pondérable. Qualitativement, les facteurs intangibles sont trop difficiles à pondérer et mènent souvent à de l'incohérence du jugement du décideur. On devra dans un tel cas les omettre pour ne pas fausser l'analyse. Plusieurs critères proposés par ces

auteurs n'auront pas une forte influence dans notre étude. Par exemple, les critères en regard aux ressources humaines n'interviendront pas à cause de la ressemblance des scénarios. Force est de constater que l'on est à comparer des scénarios de type cellulaire et non différents types de systèmes de production (atelier, ligne de production). Le poids de ce critère demeure non négligeable mais, au niveau des alternatives de solutions, la pondération sera sensiblement égale. Il faut de même s'assurer que les critères retenus sont assez homogènes pour être facilement comparés entre eux. Les sous-sections qui suivent décrivent les critères proposés pour notre modèle de conception.

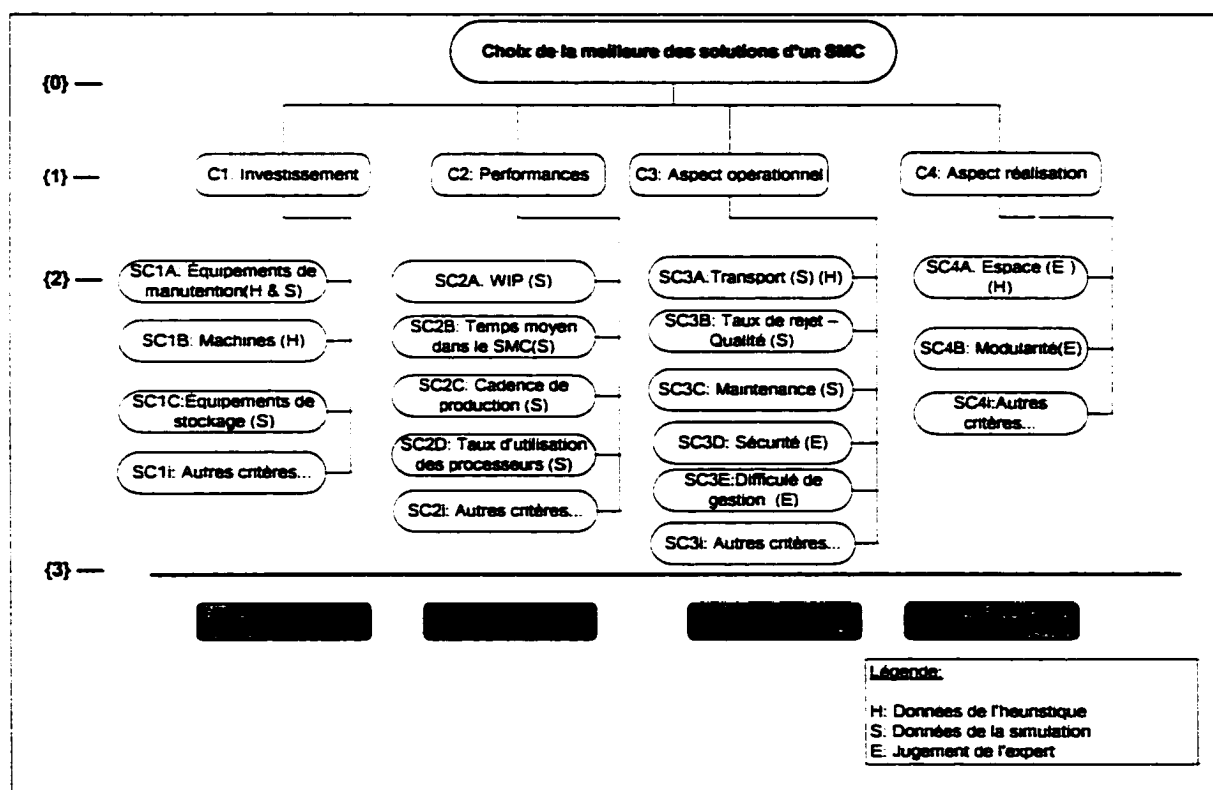


Figure 19 Structure hiérarchique de l'analyse AHP d'un SMC

4.2.1 Critère « Investissement » (C1)

Le critère investissement se décompose en quatre sous-critères. Il s'exprime surtout en terme de valeur économique et vise uniquement les frais relatifs à l'acquisition du matériel et des infrastructures nécessaires à la réalisation d'une solution. Il exclut les coûts relatifs au fonctionnement et à l'entretien. Ainsi, ce critère comprendra les équipements de manutention, les machines et les équipements de stockage. Évidemment, on est en présence de données quantitatives où l'alternative la plus économique sera la plus favorablement pondérée. *Expert Choice* est un logiciel qui possède l'avantage d'inverser la priorité des poids pour des données quantitatives. Ainsi, l'alternative possédant par exemple le coût le moins élevé en transport se verra attribuer le poids le plus élevé.

Sous-critères :

Équipements de manutention (SC1A):

Les équipements de manutention visent uniquement les chariots ou autres équipements du même type (gerbeuse, véhicule autoguidé, etc.). Ce critère inclut toute forme d'accessoires nécessaires au bon fonctionnement de ces équipements. Il ne tient pas compte non plus des équipements de manutention à l'intérieur des cellules car seul le flux intercellulaire a été modélisé. De plus, les ressources humaines nécessaires y sont exclues. La pondération est faite en fonction du nombre de ressources de transport utilisées lors de la simulation et du coût supplémentaire pour le flux intercellulaire donné par l'heuristique. En effet, l'heuristique ne prévoit que ce dernier coût en tenant compte des frais de transferts et d'un coût fixe d'acquisition d'équipement. Ce coût fut interprété pour une seule unité de transport lors de la phase 1 de conception. Ainsi, pour calculer la valeur globale de l'investissement, on multipliera le nombre de ressources utilisées

durant la simulation moins une par le coût unitaire utilisé dans l'heuristique plus le coût supplémentaire cité avant. L'hypothèse qu'il y ait un seul type d'équipements de manutention et donc d'un même coût unitaire a été posée. Enfin, l'alternative de solution nécessitant le coût le plus bas obtiendra par ce fait le poids plus élevé lors de la pondération.

Machines (SC1B):

Les machines (ou processeurs) représentent tout type d'équipement pour un procédé de fabrication ou une tâche spécifique autre que les postes d'assemblage. Tel que cité auparavant, aucune étape d'assemblage n'est prévue dans ce modèle général. Les accessoires et les outils nécessaires à chaque processeur doivent être pris en compte lors de l'évaluation du coût unitaire de chacune. Les opérateurs et les dépenses de fonctionnement et de maintenance ne sont pas pris en compte dans ces coûts. La pondération sera faite à l'aide des données de coûts compilées et fournies par l'heuristique de formation de cellules. Le coût total est la somme des capitaux investis pour chaque cellule inscrit au fichier de résultats de l'heuristique. Ainsi, plus le coût total des machines est bas, meilleur est le poids attribué au présent critère pour une alternative donnée.

Équipements de stockage (SC1C):

Les équipements de stockage comprennent tout ce qui est nécessaire à l'entreposage temporaire des stocks en cours de production. Ils comprennent les équipements dédiés à chaque tampon tels des étagères, des supports de pièces ou encore des palettes. Cette ressource devient essentielle pour le fonctionnement d'un système en flux tiré et peut prendre le rôle de système de contrôle des stocks de type «kanban». Ce critère sera pondéré en nombre maximal de toutes les ressources tampons (espace) utilisées lors de l'étape de simulation. Cependant, si nous supposons qu'un même type d'équipement sera utilisé pour tous les scénarios, nous fixerons son coût unitaire à 1 dollar ce qui facilitera la prise de données de la simulation. L'inversion des priorités sera utilisée ici

lors de la pondération où un scénario requérant un minimum de ressources tampons sera favorisé par rapport au autre.

À noter que si différents types d'équipements de stockage sont requis pour différents scénarios, la pondération sera modifiée en tenant compte du nouveau coût unitaire par type de tampon. Il en va de même pour les équipements de manutention.

4.2.2 Critère « Performance » (C2)

Ce critère se décompose en cinq sous-critères et est pondéré à l'aide des données de résultats de la simulation. Il s'agit donc des critères de performance en mode dynamique de chaque scénario de SMC.

Sous-critères :

Taux d'encours moyen, WIP (SC2A) :

Le taux d'encours moyen est le nombre moyen de produits inachevés circulant dans le système pour la durée de la simulation. Ce nombre, fourni par l'étape de simulation, est sensiblement relatif aux goulots d'étranglement et peut du même coup signifier la présence d'un manque de capacité ou encore d'un problème d'ordonnancement. Pour ce critère, il va de soi qu'un faible nombre d'encours sera favorisé pour une bonne solution, car un nombre élevé signifiera une augmentation des coûts d'inventaire. Ce nombre sera fourni directement par le rapport de simulation. Tel que déjà discuté, il importe de rappeler que le taux d'encours sera sensiblement faible avec un aménagement de type cellulaire car il s'agit d'un système en flux tiré.

Temps moyen dans le système (SC2B):

Le temps dans le système est le délai qu'un produit prend en moyenne pour franchir toutes les étapes relatives à sa production. Pour le contexte d'analyse, sa pondération

prendra référence avec la moyenne de tous les temps dans le système des produits. La pondération sera faite à partir du fichier de résultats de la simulation et favorisera le temps le moins élevé.

Temps de cycle de production (SC2C):

Le temps de cycle se définit par l'inverse de la cadence de production qui représente le rythme auquel les produits sortent du système indépendamment du temps qu'ils y ont passé. Le fichier de résultats de la simulation fournit le temps moyen entre les sorties de deux items complétés. Pour les fins de pondération, un temps de cycle bas sera favorisé.

Taux moyen d'utilisation des processeurs (SC2D) :

Le taux moyen d'utilisation des processeurs est exprimé en pourcentage par rapport à la capacité disponible. S'il y a deux machines M001 disponibles dans une cellule, ce pourcentage tiendra compte des deux ressources. Les données sont extraites à l'aide des fichiers sommaires de résultats de la simulation qui fournissent pour chaque cellule le taux d'utilisation du type de ressource pour la durée de la simulation. Le taux moyen est obtenu en calculant la somme des taux d'utilisation de chaque machine divisée par le nombre total de processeurs dans le système. Un taux élevé sera favorisé lors de la pondération.

4.2.3 Critère « Aspect opérationnel » (C3)

Le critère de l'aspect opérationnel vise à tenir en compte l'effet de certains indicateurs de performance sur le côté plus opérationnel du système de production. Ce dernier sous-entend ici la difficulté opérationnelle d'une alternative par rapport à une autre sous cinq sous-critères distincts. Ces sous-critères sont le transport, la maintenance corrective due aux pannes, le taux de rejet versus la qualité, la sécurité et la gestion des opérations de production.

Sous-critères :

Transport (SC3A):

Le sous-critère transport vise à pondérer la charge de gestion des opérations de transport due au flux intercellulaire. Trois aspects augmenteront la difficulté de gestion : le nombre de type de trajets, la quantité globale de transferts et le temps de transport. Par exemple, si pour un scénario les transports sont concentrés entre deux cellules seulement, le nombre de type de trajets sera faible ce qui augmentera la facilité de gestion. Toutefois, si pour le même nombre de transferts, un autre scénario disperse ses transports entre 4 ou 5 cellules, ce dernier sera désavantagé par rapport à l'autre car la coordination dépendra de plus de variétés de produits. La pondération sera assurée par les données du fichier de résultats de la simulation pour le temps global et par le fichier de résultats de l'heuristique pour les types de trajets. Ainsi, ce critère pourra être pondéré qualitativement ou encore quantitativement selon l'interprétation des données par l'expert.

Taux de rejet – Qualité (SC3B):

La qualité est pondérée par le nombre de pièces rejetées durant les opérations de production. Le taux de rejet est propre à la machine et à la cellule. La pondération sera faite à l'aide du volume total de rejets de tous les produits fournis à la fin de la simulation.

Maintenance (SC3C):

Le sous-critère maintenance se définit par la facilité à gérer l'entretien correctif des processeurs du système manufacturier cellulaire en cas de panne seulement. Toute tâche d'entretien préventif a été omise pour la simulation. La pondération sera représentée par le temps de pannes global calculé par la somme de tous les temps de réparation et compilé durant la simulation.

Sécurité (SC3D) :

Le sous-critère sécurité est le plus intangible de tous les sous-critères. Il exprime le risque de la configuration à causer des accidents de travail dus aux transports de pièces, de l'incompatibilité de deux postes de travail ou encore du mauvais aménagement d'une cellule (encombrement). Sa pondération dépendra de l'expérience et du jugement du concepteur. Si ce dernier ne dispose pas de l'information ou du recours d'un expert, ce critère devra être omis dans l'analyse.

Gestion des opérations (SC3E) :

La gestion des opérations fait référence à la difficulté à coordonner le suivi des opérations. Comme le dernier sous-critère, sa pondération est strictement qualitative et dépend de la connaissance du concepteur à interpréter des configurations de systèmes manufacturiers cellulaires. Sa pondération sera influencer par le type de regroupement réalisé par l'heuristique, le choix des processeurs (ou machines) et le degré de flux intercellulaire. Par exemple, si le regroupement des cellules a créé une configuration non uniforme au niveau de la grosseur des cellules, il s'ensuivra que les plus grosses cellules auront tendances à créer beaucoup plus de flux intracellulaire varié pour plusieurs produits compliquant ainsi la gestion même de cette cellule.

4.2.4 Critère « Aspect faisabilité » (C4)

Ce dernier critère fait référence à l'implantation physique du système. Il comprend les sous-critères espace et modularité.

Sous-critères :

Espace (SC4A):

Le sous-critère espace est un critère quantitatif pondéré avec les résultats de l'heuristique. Il représente la superficie totale requise pour la configuration des postes de travail. L'inversion des priorités sera faite où la configuration nécessitant le moins d'espace obtiendra la pondération la plus élevée. Il peut aussi être pondéré qualitativement à l'aide des connaissances d'un expert.

Modularité (SC4B) :

La modularité au changement fait référence à la flexibilité de la configuration face à un changement éventuelle de la demande tant au niveau du type de produit que la quantité. Par exemple, une configuration très uniforme au niveau de la grosseur des cellules aura tendance à favoriser la modularité, voire la flexibilité au changement. La modularité pourrait aussi s'exprimer par la capacité d'une configuration (une fois implantée) à être modifier facilement ce qui implique des mouvements de machines. Évidemment, l'avis d'un expert est essentiel à la pondération de ce sous-critère.

4.3 Approche de pondération

Les critères de sélection ont été décrits à la section précédente où l'on citait la source de données et la manière dont la pondération était faite. Tel que déjà mentionné, la source d'information est alimentée principalement par les résultats de l'heuristique, de la simulation et du jugement de l'expert ou du concepteur. Cette section décrit plus précisément l'utilisation de ces informations pour la pondération dans l'analyse AHP. Tel que cité précédemment, l'approche AHP de Saaty (1982) possède cette particularité de pouvoir réunir les aspects quantitatifs et qualitatifs de plusieurs pondérations et de prendre en compte l'incohérence des pondérations qualitatives. La méthode AHP implique deux genres de pondération, soit l'établissement des poids de chaque critère et

sous-critère dans une première évaluation et, par la suite, la pondération des alternatives de solutions pour chaque critère.

4.3.1 Stratégie de pondération entre les critères

L'attribution du poids de chaque critère est la tâche la plus ardue et discutable de cette phase. Plusieurs auteurs dans la littérature s'en remettent à une enquête dans l'entreprise visée par le projet de conception (Cantamassa et Turonni, 1997) ou encore laissent à la discrétion du concepteur cette évaluation (Shang et al., 1998). Dans la même voie de pensée, nous proposons de laisser la liberté au concepteur ou encore à l'entreprise d'évaluer le poids de ces critères. De cette manière, l'outil de conception devient beaucoup plus flexible et plus adaptable au besoin de chacun. La démarche de pondération procède du haut vers le bas de l'arbre hiérarchique. Pour compléter cette étape efficacement, la pondération doit se faire qualitativement deux à deux entre les critères d'un niveau en fonction de leur parent dans la hiérarchie (voir Tableau V, section 4.4). Par exemple, le critère «Investissement» sera comparé en degré d'importance au critère «Performances» avec le respect du but principal de toute l'analyse. La question qui est alors posée est : « De combien le critère «Investissement» est plus important que le critère «Performances» pour le choix du meilleur SMC ? ». De la même manière, les sous-critères seront comparés deux à deux mais en rapport d'importance avec leur parent, soit leur critère principal respectif. Cette pondération binaire sera strictement qualitative pour tous les niveaux de critères de la hiérarchie.

4.3.2 Pondération des alternatives par critère

Les alternatives sont comparées entre elles pour chacun des sous-critères à l'aide des données des sources citées déjà. C'est ici qu'intervient la force de l'analyse AHP où les alternatives peuvent être pondérées d'un côté qualitativement pour un critère et de l'autre quantitativement pour un autre critère. Il importe de rappeler, à point-ci de la démarche, l'importance de retenir des critères tangibles pour tirer profit de l'information

fournie autant par l'heuristique de formation de cellules que du modèle de simulation. La figure 20 montre comment les valeurs quantitatives peuvent être entrées au logiciel pour chaque scénario en rapport avec les temps de maintenance. Par ailleurs, dans le cas où l'on devrait favoriser l'alternative avec le temps minimale de pannes, le logiciel *Expert Choice* offre une fonction d'inversion des priorités qui permet cette particularité sans effectuer de changement aux données. On remarque bien dans cette figure que l'alternative de solution SA6 possède le meilleur poids et le plus bas temps de pannes (60 262 minutes).

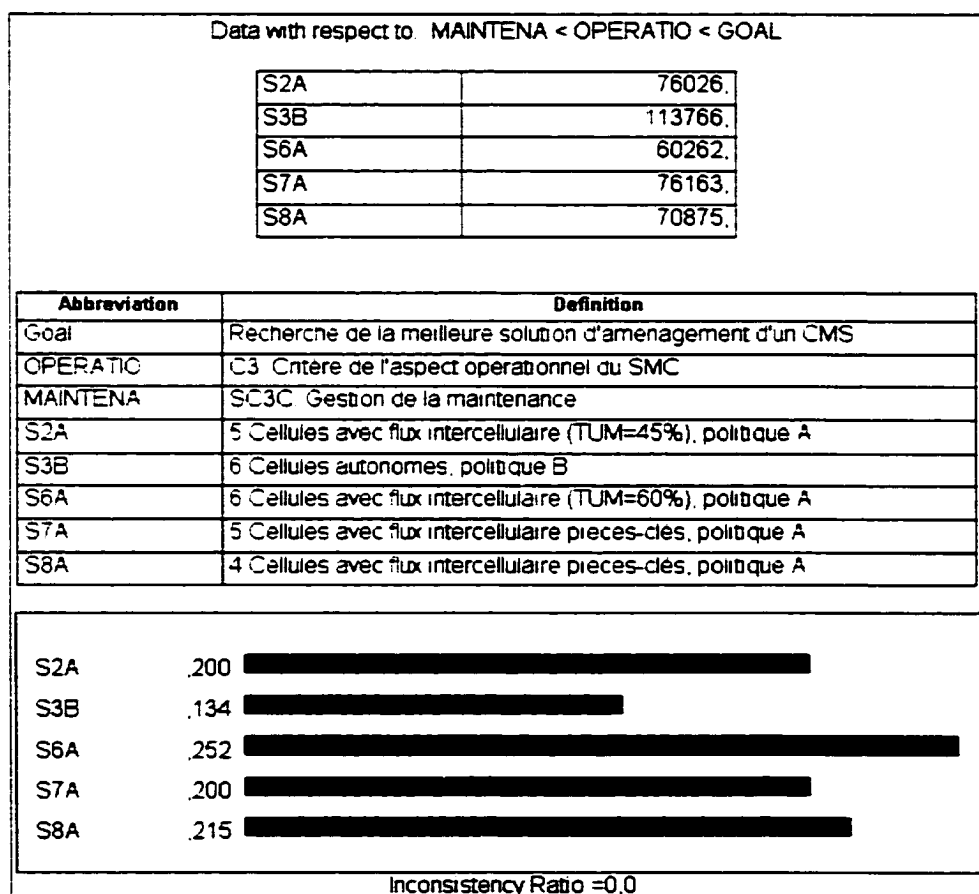


Figure 20 Pondération quantitative des alternatives, logiciel *Expert Choice*

4.4 Synthèse des pondérations

Après chaque pondération, la méthode AHP fournit un vecteur de priorités locales aux critères ou sous-critères. Ce vecteur est une synthèse faite par une transformation mathématique des pondérations. Évidemment, ce vecteur existe pour chaque ensemble de critères ou de sous-critères. Après l'étape de pondération des alternatives de solution, un vecteur global de priorité incluant les vecteurs locaux par la méthode de calcul propre à l'analyse AHP. Pour chaque résultat de pondération qualitative, le ratio d'incohérence est vérifié s'il n'est pas supérieur à 0.10. La moyenne des ratios sera aussi tenue pour compte dans la synthèse finale.

Tableau V

Comparaison des sous-critères du critère «Investissement», *Expert Choice*

Investissement	<i>Équipements de manutention</i>	<i>Machines</i>	<i>Équip. Stockage</i>	Vecteur de poids
<i>Équip. manutention</i>	1	¼	5	0.247
<i>Machines</i>	4	1	8	0.699
<i>Équip. stockage</i>	1/5	1/8	1	0.064
IC = 0.02				= 1.000

À titre d'exemple, le Tableau V montre la comparaison des sous-critères du critère «Investissement». La dernière colonne présente le vecteur de poids calculé pour cette pondération binaire. L'indice d'incohérence IC calculé par le logiciel indique la valeur de 0.02. Pour vérifier si le ratio d'incohérence RC est acceptable, on utilise la relation 4.1 et l'échelle de Saaty (Tableau VI) selon le nombre de critères correspondants. Pour cet exemple, RC égal à 0.034 (0.02/0.58) ce qui est inférieure à 0.10 et représente une incohérence du jugement négligeable selon Saaty (1982). Dans le cas contraire, le concepteur devrait revoir quelles pondérations de critère sont en cause et les reprendre.

$$RC = \frac{IC}{RI} \leq 0.10 \Rightarrow \text{on accepte la matrice} \quad (4.1)$$

Tableau VI

Échelle aléatoire de Saaty

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
	0.0	0.0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	...

La lettre N représente le nombre de critères de la matrice de comparaison.

4.5 Analyse de sensibilité et prise de décision

Le logiciel *Expert Choice* excelle particulièrement dans sa capacité à représenter sous forme de synthèse graphique les poids des critères et des alternatives. Les graphiques de la figure 21 illustre sous forme de colonnes les poids de chaque critère sur une échelle de 100% en ordonnée, à gauche du diagramme. Les scores de chaque alternative par rapport à chaque critère principal sont représentés à l'aide d'une ligne tracée correspondant à l'alternative énoncée dans l'ordonnée de droite. Ce graphe permet de faire varier le poids de chaque critère de manière à analyser l'effet de cette variation sur le classement final des solutions. Par exemple aux figures 21 et 22, si l'on néglige l'importance de l'aspect opérationnel en diminuant quelque peu la valeur de sa colonne, quel impact aura ce changement sur le classement final ? Le graphe de droite montre effectivement que le fait de baisser le poids de ce critère change la position du classement final. D'un autre point de vue d'analyse, on pourrait se demander dans quelle situation les autres scénarios disqualifiés pourraient être préférés comme solution. Plusieurs possibilités d'analyse peuvent donc être explorées grâce à ce type de graphe.

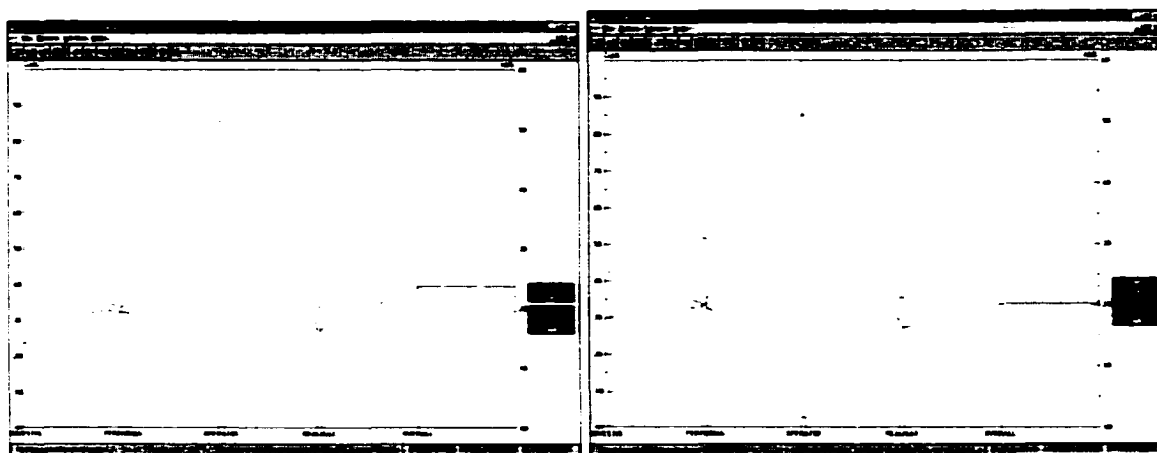


Figure 21 Graphes de sensibilité de l'analyse AHP. logiciel *Expert Choice*

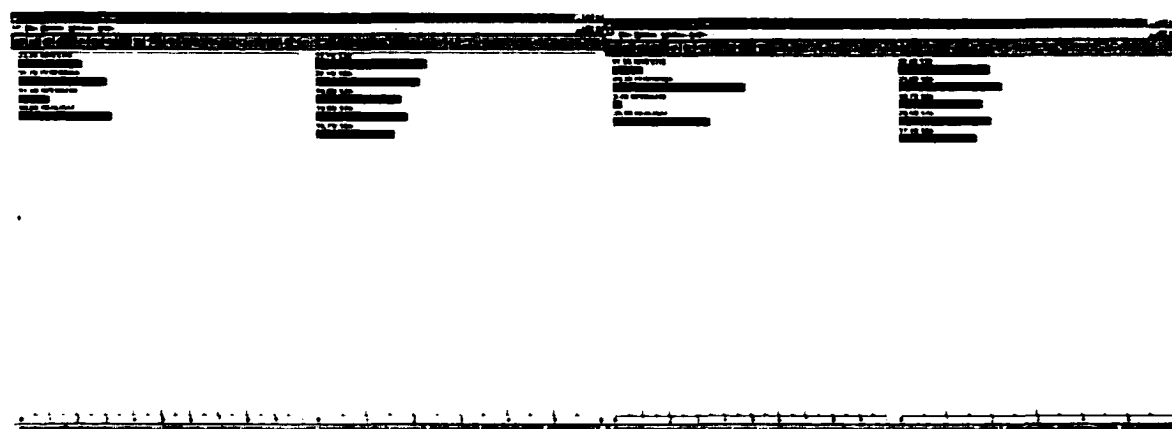


Figure 22 Graphes dynamiques de sensibilité. logiciel *Expert Choice*

Évidemment, il importe de vérifier pour les autres alternatives quel effet aura la variation du poids de certains critères sur le classement final, mais il n'est pas question ici de remettre en cause la pondération des critères faite à l'étape précédente. Le concepteur validera la robustesse de sa décision en vérifiant si le fait de varier le poids de certains critères dominants met en doute le choix final. Ainsi, plus l'avance de la meilleure alternative est menacée par ces variations, moins le choix de l'alternative sera robuste.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les critères de décision qui auront une influence sur le choix du système qui correspond au choix stratégique et économique du concepteur. Ces critères sont proposés avec réserve de pouvoir les pondérer. Si certains ne peuvent être pondérés justement, il est préférable de les éliminer ou de leur attribuer la note zéro. Nous avons aussi présenté l'approche de pondération qui peut être autant de type qualitatif que quantitatif. Une synthèse des pondérations a été montrée sous forme d'un vecteur prioritaire et qu'il pouvait y exister une incohérence dans les pondérations qualitatives. Enfin, nous avons démontré que l'usage du logiciel permettait non seulement d'effectuer les calculs de l'analyse AHP, mais aussi une analyse graphique de la sensibilité de chaque critère par rapport au choix final proposé par cette méthode.

CHAPITRE 5

APPLICATION ET ANALYSE

5.1 Introduction

Le cinquième chapitre de ce mémoire démontre l'efficacité et le fonctionnement du modèle général de conception d'un système manufacturier cellulaire appuyé par un cas typique d'atelier d'usinage. Inspiré d'un problème de Boe et Cheng (1991), nous reprenons leur exemple en le modifiant quelque peu. Nous interpréterons cet exemple comme un cas d'entreprise qui se spécialise dans l'usinage de composants mécaniques pour le milieu de la machinerie lourde industrielle. Aucune étape d'assemblage n'est prévue dans les séquences d'opération. Chaque phase de notre modèle général sera démontrée ici en détaillant les entrées de données et les résultats.

5.2 Description du cas exemplaire

Pour démontrer la validité d'une telle méthode de conception, il était nécessaire d'avoir un exemple comprenant un niveau de détails suffisant pour exploiter autant la force de l'outil heuristique de formation de cellules que le niveau de détails qu'offre le modèle de simulation. L'exemple utilisé par les derniers auteurs mentionnés comprenait initialement 35 pièces et 20 machines. Il a été modifié en diminuant le nombre de pièces à 15 types et en insérant plus de possibilités de routage pour certaines opérations. Plus d'une possibilité de routage par opération assureront ainsi la flexibilité de routage que l'étape de simulation offre.

Pour la première phase de la méthode de conception, les données initiales nécessaires à l'heuristique comprennent les paramètres de production et quatre bases de données. La figure 23 montre les paramètres généraux de production établis et indique seulement 2 semaines d'inactivité par année ainsi que le temps de production disponible par semaine.

Ce dernier paramètre a été établi en supposant qu'il y a deux quarts de travail par jour à raison de huit heures par quart incluant les pauses et les heures de repas et ce, du lundi au vendredi. Les données associées aux taux d'intérêt, de capital disponible et d'espace maximal de l'atelier permis sont spécifiées pour des fins d'estimation de coûts de l'aménagement. Comme nous le verrons à la section suivante, ces paramètres peuvent faire partie de la stratégie de création de scénario. À défaut du cas d'application traité ici, le concepteur pourrait utiliser des paramètres différents pour certains scénarios.

Parasètres	
Nombre annuel de semaines de production	58.8
Nombre de jours de produc. par semaine	5
Nombre hebdomadaire de minutes de prod.	4888.8
Taux d'intérêt d'emprunt actuel	18.00
Capital d'investissement maximal	1000000.00
Surface maximale de l'atelier perwise	10000.00

Figure 23 Paramètres généraux de production, Heuristique phase 1.

Les bases de données comprennent l'information sur les machines, les pièces, les opérations et les procédés de fabrication. Les informations détenues pour les machines sont :

Tableau VII

Base de données des machines, programme de l'heuristique

[illegible]

À noter que la grosseur des tampons d'entrée et de sortie est spécifiée pour des fins d'information pour la simulation car ces nombres n'interviennent pas dans l'heuristique de formation de cellules proposée ici.

La base de données des pièces comprend les informations présentées au Tableau VIII.

Tableau VIII

Base de données des pièces, programme de l'heuristique

# de pièce	Nom	Demande hebdo.	Prix de vente (\$\$)	Coût de matière (\$\$)	Recyclage valeur (\$\$)
P001	Pièce #1	40	225.00	100.00	60.00
P002	Pièce #2	29	175.00	90.00	50.00
P003	Pièce #3	44	225.00	70.00	70.00
P004	Pièce #4	37	205.00	110.00	80.00
P005	Pièce #5	60	200.00	95.00	85.00
P006	Pièce #6	58	210.00	95.00	85.00
P007	Pièce #7	65	185.00	75.00	60.00

Les informations relatives aux opérations et aux procédés sont présentées au tableau IX où le temps de mise en course («set-up») d'une opération est mis à zéro pour signifier qu'il est inclut dans le temps de procédé.

Tableau IX

Base de données des opérations, programme de l'heuristique

# de pièce	# opération	# machine	Temps de prod. (min)	Temps set-up	Taux de rejet (%)
P001	OP001	M001	10.69	0.00	0.675
P001	OP001	M004	12.50	0.00	0.737
P001	OP001	M010	11.50	0.00	0.997
P001	OP002	M003	28.93	0.00	1.986
P001	OP002	M005	31.93	0.00	0.956
P001	OP003	M007	24.31	0.00	1.240
P002	OP001	M011	11.50	0.00	0.990
P002	OP001	M003	15.93	0.00	1.980
P002	OP002	M005	23.93	0.00	0.950
P002	OP003	M007	24.31	0.00	1.240
P002	OP003	M012	20.55	0.00	1.135

Tel que montré aux trois premières lignes du tableau ici haut, la flexibilité de routage est incluse dans ce fichier. On peut observer dans les cases grises que la première opération de la pièce #1 peut être faite sur les machines M001, M004 ou M010.

5.3 Génération des scénarios

Tel que présenté au chapitre 2, la génération de scénarios est un processus réversible où le concepteur construit ses scénarios en modifiant par essais répétitifs les paramètres qu'il juge influents et favorables à la convergence d'une meilleure configuration. Pour le présent cas d'application, les effets de variation de certains paramètres et l'ajout du flux intercellulaire par rapport aux configurations de cellules autonomes seront vérifiés à la

première étape de conception. De plus, pour améliorer le regroupement cellulaire, des pièces seront imposées à certaines cellules en ayant recours au concept de pièces-clés. À la deuxième étape de conception, l'effet de la flexibilité de routage sous deux politiques distinctes sera analysé lors de la simulation des meilleurs scénarios retenus en phase I, afin de trouver la meilleure politique pour chaque scénario.

Ainsi, la stratégie de génération de scénarios proposée ici peut être résumée comme suit. La génération des alternatives de solutions se fera en deux étapes. D'une part, l'étape de l'heuristique générera des scénarios initiaux qui seront soumis à un filtrage où le concepteur doit intervenir et guider l'heuristique vers l'amélioration des scénarios. Seules les solutions les plus prometteuses passeront à la phase de simulation sous différentes politiques de flexibilité de routage. Par conséquent, chaque politique appliquée aux scénarios créera en soi de nouvelles alternatives de solutions (Figure 24).

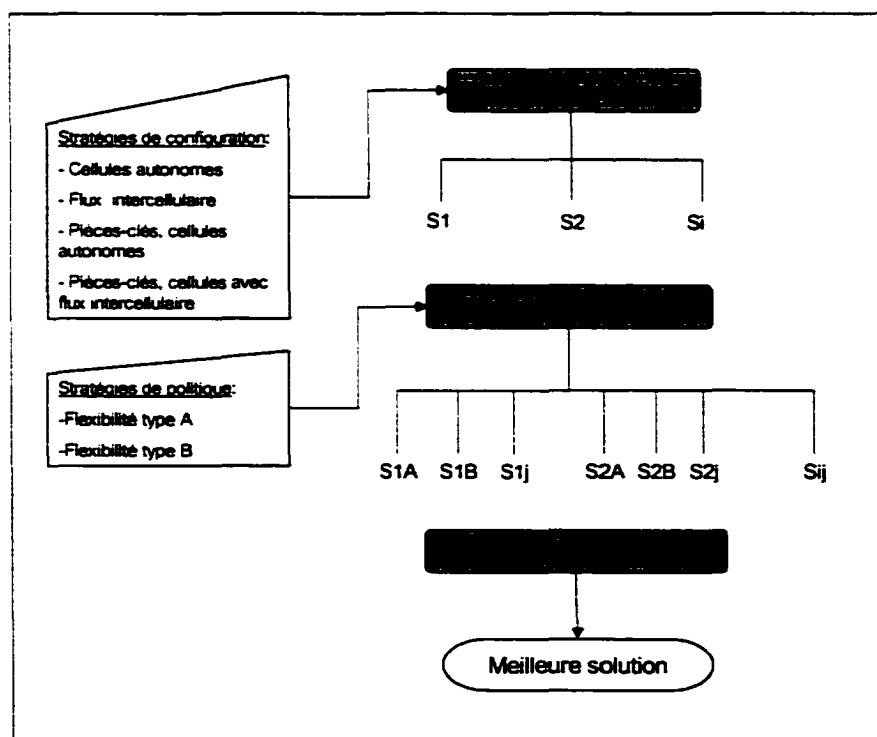


Figure 24 Génération successive des scénarios

5.3.1 Stratégie, phase Heuristique

Cette section présente les types scénarios qui ont été générés lors de l'expérimentation et les paramètres sur lesquels le concepteur s'est basé pour extraire les meilleures configurations. Le premier type de scénario suggéré est un agencement de cellules complètement autonomes où la séquence d'opération indique que tous les produits sont complétés dans leur cellule respective. Cette configuration est le point de départ pour la recherche de meilleures solutions. La figure 25 illustre une configuration de cellules autonomes où les seuls transports, représentés par les flèches, comprennent l'approvisionnement des cellules en matière première, le flux intracellulaire et le transport des produits finis aux zones de stockage.

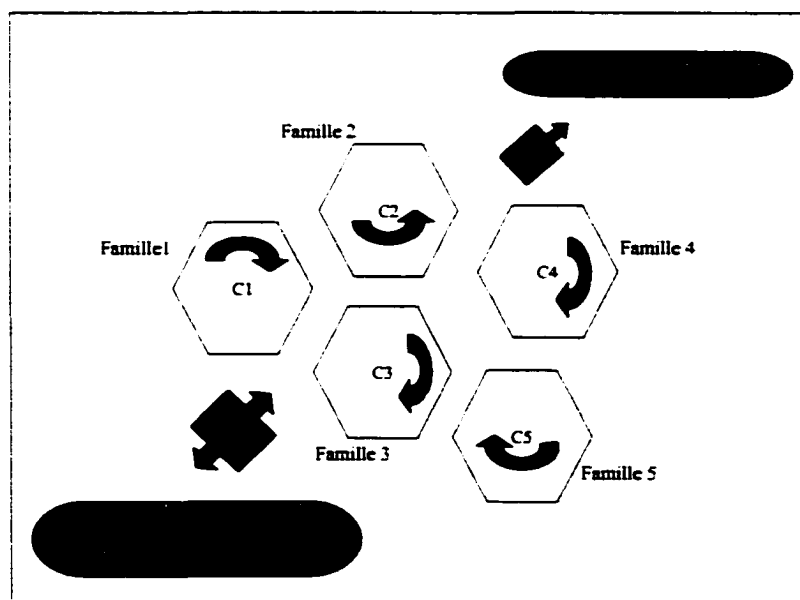


Figure 25 Schéma d'un aménagement autonome

Le 2^e type de scénario possible est similaire au premier à l'exception que celui-ci permet le flux intercellulaire afin d'éliminer les machines les moins utilisés et de redistribuer les opérations aux autres machines du système (Figure 26).

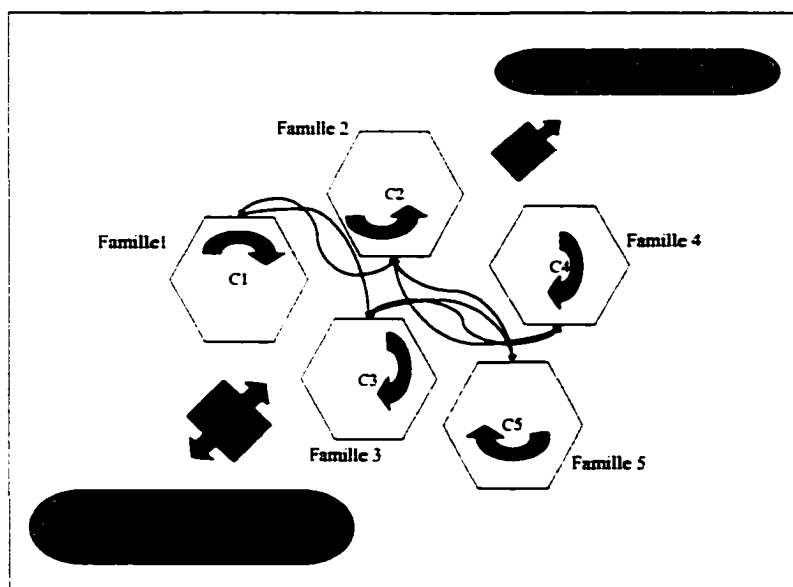


Figure 26 Schéma d'un aménagement avec flux intercellulaire

Le dernier type de scénario utilisé dans l'expérimentation emprunte le concept de pièces-clés. À cette étape, l'intervention du concepteur fut faite en réglant les paramètres de conception à l'aide des résultats des scénarios antérieurs. Il est à noter qu'à cette étape, l'heuristique peut aussi créer des configurations avec ou sans flux intercellulaire. Le tableau X résume les paramètres exploités pour chaque type.

Tableau X

Paramètres de conception pour le cas d'application, phase heuristique

Type de configuration	Paramètres
Cellules autonomes	Coefficient CSCL Nombre minimal de cellules Nombre maximal de pièces par cellule Nombre maximal de processeur par cellule Surface maximale des processeurs par cellule
Cellules avec flux intercellulaire	Coefficient TUM
Pièces-clés, cellules autonomes	Pièces imposées aux cellules Nombre de cellules imposées Surface maximale des processeurs par cellule
Pièces-clés, avec flux intercellulaire	Coefficient TUM

5.3.2 Stratégie, phase Simulation

Suite au filtrage des meilleurs scénarios, la phase de simulation impose à ces derniers la flexibilité de routage sous différentes politiques d'ordonnancement possibles. Quatre règles d'assignation furent définies pour ce cas et furent regroupées en deux politiques différentes, type A et type B. Chacune sera appliquée à chaque scénario de base pour former de nouvelles alternatives de solutions. Ainsi, si le processus de flexibilité est enclenché avec la première politique (type A), les règles suivantes seront appliquées dans l'ordre suivant:

- a. On choisit le temps de production le plus court.
- b. Si égalité en a), on choisit l'espace tampon disponible le plus grand.

Pour la deuxième politique (type B), les règles d'assignation suivantes seront appliquées respectivement:

- a. On choisit le taux de rejet le plus bas.
- b. Si égalité en a), on choisit le processeur le plus proche dans le SMC.

Plusieurs autres possibilités de politiques existent et sont citées au chapitre 3. Ces règles peuvent être modifiées et agencées dans l'ordre désiré en apportant au fichier de routine les modifications concordantes. Il est à noter que l'ordre des politiques présentées repose directement sur les stratégies et les politiques de l'entreprise.

5.4 Phase 1, Heuristique

La génération des solutions avec l'outil informatique utilisant la méthode heuristique de formation de cellules ne représente aucune contrainte de temps au niveau de l'exécution. La génération de chaque scénario est résumée ici. Un exemple sommaire du fichier de résultats est présenté à l'annexe 3.

Le scénario #1 :

Les paramètres de conception pour la première configuration de type cellules autonomes sont représentés à la figure 27. Pour débiter la conception, nous avons fixé les paramètres de manière à relaxer les contraintes. Ainsi, dans le but d'obtenir un minimum de cinq de cellules, le seuil du coefficient de similarité fut fixé à 0.50 et le nombre minimal de cellules à cinq (5). À titre de précision, tel que déjà décrit au chapitre 2, le fait de faire varier ce seuil aura les effets suivants : d'un côté, un seuil élevé aura tendance à être très sévère pour la fusion de cellules et, de l'autre, un seuil bas aura pour effet de tendre vers le nombre minimum de cellules permises. Par exemple, un coefficient de similarité fixé à 0.80 nous formerait un agencement de 11 cellules ce qui représenterait une recherche de solution beaucoup plus rigide et sévère à l'égard de

l'étape de fusion de cellules. Pour le présent cas, on a abaissé ce seuil à 0.50 pour chercher à tendre vers 5 cellules.

The image shows a graphical user interface for a cell aggregation process. The title bar at the top reads "Aggregation de cellules". Below the title, there are two main input areas. The first area is labeled "Aggregation de cellules" and contains a text box with the number "5" entered. The second area is labeled "Parametres des algorithmes" and contains an empty text box. At the bottom of the interface, there are three buttons: "[Regroupement]", "[Flux inter-cellulaire]", and "[Sortie]".

Figure 27 Paramètres de conception pour le scénario #1

La figure 28 présente la matrice de regroupement des cellules et des familles de produits pour le scénario #1. Les colonnes représentent les produits et les lignes représentent les machines. Chaque case contenant des numéros de séquence d'opérations correspond à la fois à une famille de produits et à une cellule de machines. Par exemple, la première case du haut à gauche de la matrice formera la famille des produits 1, 3, 5 et 15. Leur cellule contiendra les machines M001, M002, M003, M005, M007, M008 et M017.

			1	3	5	15	2	7	12	4	6	9	10	11	13	8	14
M001	- 1	0.543	1			1											
M002	- 1	0.848			3	5											
M003	- 1	0.839		1	1												
M005	- 2	0.802	2		2	2											
M007	- 1	0.889	3	2		3											
M008	- 2	0.611	4		4	4											
M017	- 2	0.898	5	3	5	3											
M002	- 1	0.346					1										
M004	- 1	0.193					2										
M011	- 1	0.471					3										
M017	- 1	0.511					4										
M004	- 1	0.689						1	2								
M007	- 1	0.867						2	1								
M014	- 1	0.371							4								
M016	- 1	0.217							5								
M018	- 1	0.522						4	6								
M001	- 2	0.466								1				1			
M004	- 1	0.306									1				2		
M006	- 1	0.869								5			1		1		
M011	- 1	0.638								1	2						
M012	- 3	0.721								2	3	3		2	4		
M013	- 1	0.731										2	2	3			
M014	- 1	0.285											3		3		
M015	- 2	0.885								3	4	4		4	3		
M016	- 2	0.762								4	5	5		5			
M019	- 1	0.176								5							
M002	- 1	0.556														1	
M005	- 1	0.739														2	2
M006	- 1	0.744														1	3
M010	- 2	0.502														3	5
M019	- 1	0.248															4
M020	- 1	0.632														4	6

Figure 28 Résultats de la formation de cellules, scénario #1

Le nombre de machines et l'estimation du taux d'utilisation sont inscrits respectivement à la droite du nom des machines. Ce scénario est fait de cinq cellules dont la plus grande (la 3^e) contient quinze (15) machines de dix (10) types différents cités à gauche de la matrice. Cette caractéristique est un peu problématique, car le fait d'avoir de très grande cellule éloigne la configuration des avantages d'un système manufacturier cellulaire. Effectivement, une très grande cellule possédera un nombre élevé de transports internes et de types d'opération de production ce qui compliquera la gestion des opérations. On aura tendance à y retrouver les caractéristiques d'un atelier de production conventionnel où les processeurs sont regroupés par type.

Un autre fait à remarquer est la deuxième cellule qui n'a été conçue que pour un seul produit. On peut attribuer ce résultat en raison de la contrainte imposée pour un minimum de 5 cellules car cette cellule pourrait être rapidement jumelée à une autre qui contient déjà quelques-unes de ses machines. Avant de tenter de corriger les désavantages notés ici, nous vérifierons comme deuxième scénario l'effet de l'intervention du flux intercellulaire. Le rapport sommaire tel l'exemple fourni en annexe 3 indique les caractéristiques de la solution résumées au tableau XI.

Tableau XI

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #1

Scénario 1						
	1 902 651,88	798 458,00	997 499,75	2 947 913,75	1 361 870,12	8 008 393,50
	582 779,19	200 785,36	282 091,72	888 656,75	384 850,31	2 339 163,33
	1 000,00	400,00	500,00	1 500,00	700,00	4 100,00
	0,86	0,43	0,57	0,7	0,62	0,64
	10	4	5	15	7	41,00

Le scénario #2 :

Les paramètres de conception pour un regroupement d'un minimum de cinq cellules avec flux intercellulaire furent les mêmes que le scénario #1 (Figure 28). À cette étape, l'heuristique nécessitait les paramètres supplémentaires présentés à la figure 29.

Coût de gestion pour les transferts intercellulaires

Système de manutention

Paramètres

Figure 29 Paramètres supplémentaires de conception pour le scénario #2

Les coûts relatifs à la gestion des transferts intercellulaires ont été fixés approximativement pour l'exemple d'application car d'une part cela représente une donnée difficile à évaluer et d'autre part, ils n'étaient pas disponibles. Du côté du taux d'utilisation minimal des machines, l'heuristique ne permet pas un taux minimal plus sévère que 60 %. Ainsi, plus ce taux est exigent (élevé), plus l'heuristique aura tendance à proposer une configuration avec un taux de transferts intercellulaires important. Par exemple, pour un taux de 59%, le nombre de transports intercellulaires sera de 15 comparativement à 5 pour 25%. Étant donné que les recherches de scénarios débutaient, ce taux fut fixé dans la médiane soit 45% pour avoir un point de départ d'analyse.

			1	3	5	15	2	7	12	4	6	9	10	11	13	8	14
M001	-	1	0.543	1			1										
M002	-	1	0.605			5	1										
M003	-	1	0.839	1	1												
M005	-	2	0.802	2	2	2											
M007	-	2	0.829	3	2	3	3										
M008	-	2	0.611	4		4	4										
M017	-	2	0.800	5	3	5	6										
M011	-	1	0.471				3										
M017	-	1	0.511				4										
M004	-	1	0.880				2	1	2			1			2		
M005	-	1	0.146					1									
M007	-	1	0.867					2	1								
M014	-	1	0.527					3	4								
M018	-	1	0.522					4	6								
M001	-	2	0.466							1				1			
M006	-	1	0.757										1		1		
M011	-	1	0.638							1	2						
M012	-	3	0.721							2	3	3		2	4		
M013	-	1	0.731										2	2	3		
M014	-	1	0.285											3		3	
M015	-	2	0.885							3	4	4		4	3		
M016	-	2	0.871					5		4	5	5		5			
M002	-	1	0.556													1	
M005	-	1	0.739													2	2
M006	-	1	0.856							5						1	3
M010	-	2	0.502													3	5
M019	-	1	0.424							5							4
M020	-	1	0.632													4	6

Figure 30 Résultats de la formation de cellules, scénario #2

La figure 30 montre le résultat de la formation de cellules pour le scénario #2. On comprend rapidement que cette solution est un dérivé du scénario #1. La 2^e cellule qui ne comportait qu'un seul produit est toujours en place mais avec 2 machines en moins. En effet, les opérations relatives à ces deux types de machine seront prises en charge par les cellules #1 et #2. De plus, les cellules #1 et #4 demeurent presque inchangées au niveau de leur famille de produit et de leurs types de machine. Ceci démontre bien que l'étape de l'heuristique visant à introduire le flux intercellulaire démarre avec la solution de cellules autonomes. Ainsi, pour ce scénario, cinq (5) pièces (#2, #12, #4, #9 et #13) devront être transférées à d'autres cellules pour compléter l'une de leurs opérations. Les chiffres situés à l'extérieur des regroupements représentent ces opérations. Un point

intéressant à remarquer sur la matrice est le partage de charge de l'opération #5 du produit #4 sur deux différentes machines de la cellule #5. Comme nous le verrons à la phase de simulation, cette opération sera assignée à une seule machine afin de satisfaire une contrainte de modélisation. Ainsi, la machine détenant la plus grande proportion sera choisie tandis que l'autre deviendra la première alternative dans les bases de données de flexibilité de routage.

Tableau XII

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #2

Scénario 2						
Scénario 2		2 079 656.25	418 761.25	976 815.06	2 607 714.25	1 361 870.12
						7 444 816.93
		617 626.88	116 406.38	294 888.56	815 726.31	393 222.41
						2 237 870.54
		1 100.00	200.00	500.0	1 300.00	700.00
						3 800
Transferts intercellulaires (TUM=45%)		0.82	0.54	0.64	0.76	0.67
						0.69
		11	2	5	13	7
						38
Transferts intercellulaires (TUM=45%)		Nombre de transports: 8 Coûts additionnels : \$ 21 119.09				

Un résumé des principales caractéristiques du rapport sommaire est présenté au tableau XII. On peut y observer que l'intervention du flux intercellulaire provoque un coût additionnel d'environ 21 100 dollars pour le transport mais permet en contrepartie des économies au niveau du capital investi d'environ 563 000 dollars. De plus, sans compter les économies sur les coûts annuels de fonctionnement des processeurs (100 000

dollars), force est de constater que cette configuration avec flux intercellulaire a amélioré le dernier scénario puisqu'elle nécessite moins d'espace, moins de machines et possède une meilleure efficacité de regroupement. Cependant, la configuration possède encore certaines faiblesses au niveau du nombre élevé de machines dans les cellules #1 et #4.

Le scénario #3 :

Pour contrer le manque d'uniformité au niveau de la grandeur des cellules, on a abaissé le nombre maximal de processeurs à 10 et le nombre de produits à 7 par cellule de même que la surface maximale à 1000 pieds carrés. On a vérifié d'abord l'effet de ces changements pour une configuration de cellules complètement autonomes.

Aggrégation de cellules

Aggrégation de cellules

Paramètres des algorithmes

[Regroupement]

Figure 31 Paramètres de conception pour le scénario #3

Le tableau XIII démontre que l'uniformité de la grosseur des cellules s'est améliorée malgré les mauvais résultats de la configuration. L'heuristique a formé une cellule de plus mais tous les critères se sont vus détériorés par rapport aux résultats des deux scénarios précédents.

Tableau XIII

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #3

Scénario 3							
		1902651,88	798458,00	1952282,00	1390939,12	1361870,12	1042437,50
							8 448 638,62
		582 779,19	200785,36	601926,62	366 940,84	384 850,31	266196,31
							2 403 478,63
		1 000	400	1000	700,00	700	500
							4 300,00
		0,86	0,43	0,70	0,54	0,62	0,49
							0,61
		10	4	10	7	7	5
							43,00

Le scénario #4 :

Pour améliorer le précédent scénario, l'effet de variation du paramètre «taux d'utilisation minimal des processeurs » (TUM) a été vérifié pour trois valeurs différentes. Tout d'abord, pour le présent scénario, un faible TUM de 25% a été imposé en conservant les mêmes données de transports qu'au scénario #2 (Figure 32). Les résultats présentés au tableau XIV démontrent une nette amélioration des résultats en faisant intervenir le flux intercellulaire. Ainsi, même en étant peu exigeant avec l'utilisation des machines, l'insertion du flux intercellulaire a procuré un gain significatif de 773 289 dollars à l'investissement et des économies annuelles de frais de fonctionnement de 123 850 dollars. De plus, la qualité du regroupement a augmenté de 7 % et l'espace nécessaire à l'aménagement a diminué de 400 pieds carrés et ce, pour seulement 6 transports intercellulaires. Il faut aussi noter que le flux intercellulaire n'occasionne qu'un faible coût additionnel de 31 780 dollars.

Coût de gestion pour les transferts intercellulaires **3.28**

Système de manutention

Paramètres

Figure 32 Paramètres relatifs au flux intercellulaire, scénario #4

Tableau XIV

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #4

Scénario 4							
Transferts intercellulaires (TUM=25%)	1902651.88	798458.00	176522.38	967709.88	119869.50	1042437.50	7 675 349.14
	582 779.19	226 575.67	567 059.44	285 473.59	351 543.62	266 196.31	2 279 627.82
	1 000	400	900	500.00	600	500	3 900.00
	0.86	0.55	0.77	0.74	0.67	0.49	0.68
	10	4	9	5	6	5	39.00
	Nombre de transports: 6 Coûts additionnels : \$ 31 780.18						

À titre de rappel, on définit par transport intercellulaire le transfert d'une opération d'un produit quelconque à une autre cellule ou famille de produits. Ce scénario représentait à ce stade ci de la recherche la meilleure solution.

Les scénarios #5 et #6:

Pour approfondir l'étude de l'effet de différents TUM, on a imposé d'abord un taux de 40% pour le cinquième scénario et ensuite un taux de 59.9% pour le sixième. Tel que le démontre le tableau de résultats du scénario #5, la solution s'améliore encore sous tous les critères pour seulement trois transferts intercellulaires de plus. Ainsi, le fait d'enlever une machine procura des économies de 207 000 dollars à l'investissement et de 34 300 dollars sur les frais annuels ce qui compense largement pour payer le très économique système de manutention. Le scénario #5 devient donc la meilleure solution.

Tableau XV

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #5

Scénario 4							
	1902651.88	595360.38	1765822.38	1191744.00	1401367.12	611259.00	7 468 204.76
	582779.19	181517.23	577906.19	333913.56	396602.06	172575.34	2 245 293.57
	1000	300	900	600	700	300	3 800.00
	0.86	0.61	0.81	0.68	0.63	0.55	0.69
	10	3	9	6	7	3	38,00
Transferts intercellulaires (TUM=40%)		Nombre de transports: 9 Coûts additionnels : \$ 37 131.38					

Le scénario #6 a été ensuite obtenu en imposant le TUM le plus sévère (59.9%) ce qui assura encore de nouveaux gains étant donnés le faible coût du système de manutention choisi *a priori* (Tableau XVI).

Tableau XVI

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #6

Scénario 6								
		1960077,75	435364,84	1926525,12	1391087,88	1401367,12	219989,62	7 334 412,33
		632 363,19	134 680,50	624 902,19	389 594,09	396 602,06	57 009,16	2 235 151,19
		1 000,00	200	1000	700,00	700	100	3 700,00
		0,91	0,62	0,8	0,65	0,63	0,53	0,69
		10	2	10	7	7	1	37,00
Transferts intercellulaires (TUM=59,9%)		Nombre de transports: 15 Coûts additionnels : \$ 47 123,84						

Malgré ces bons résultats, on remarque à la figure 33 que le regroupement comporte certaines lacunes. La cellule #2 n'existe que pour combler les besoins de l'opération #3 du produit P002 avec deux processeurs M011 avec un taux d'occupation estimé à 55%. Or, si la demande de ce produit se voit chuter significativement, la configuration se verra donc prise avec une cellule quasi inoccupée. Encore plus marginal, la cellule #6 n'a aucun produit associé ce qui va l'encontre de la philosophie de la technologie de groupes. Cette cellule ne possède qu'une machine et n'existe que pour l'opération #4 du

produit P006. Pour améliorer l'uniformité du regroupement, on tentera dans une autre voie de recherche de réduire le nombre de cellules et d'imposer des produits aux cellules en passant par le concept de pièces-clés.

		1	3	5	15	2	6	7	9	10	12	13	4	11	8	14
M001	- 1 0.543	1			1											
M002	- 1 0.848			3	5											
M003	- 1 0.839		1	1												
M005	- 2 0.802	2		2	2											
M007	- 1 0.889	3	2		3											
M008	- 1 0.842	4		4	4											
M014	- 1 0.857			4		4										
M017	- 2 0.898	5	3	5	3											
M011	- 2 0.555					3	2						1			
M004	- 1 0.880					2		3	1		2	2				
M005	- 1 0.244							1								
M006	- 1 0.757									1		1				
M007	- 1 0.867							2			1					
M012	- 2 0.738							3		3						
M013	- 1 0.731								2	2				3		
M014	- 1 0.864							3		3	4	3				
M016	- 1 0.858							5		5		5				
M018	- 1 0.522							4				6				
M001	- 2 0.466							1						1		
M012	- 1 0.687												2	2		
M015	- 2 0.543								4				3	4		
M016	- 1 0.884												4	5		
M019	- 1 0.542												5			4
M002	- 2 0.451					1									1	
M005	- 1 0.739														2	2
M006	- 1 0.744														1	3
M010	- 2 0.502														3	5
M020	- 1 0.632														4	6
M009	- 1 0.473							4								

Figure 33 Résultats de la formation de cellules, scénario #6

Les scénarios #7 et #8:

Les deux derniers scénarios furent générés avec le concept de pièces-clés à partir des résultats des scénarios #5 et #6. Pour ces nouvelles expériences, tous les paramètres de conception furent conservés et le flux intercellulaire fut permis avec un TUM de 59.9%. En vue d'améliorer le regroupement et la dimension des cellules, on a imposé à

l'heuristique une formation de cinq cellules. Les cinq pièces (ou produits) qui se sont retrouvées dans chacune des cellules furent tirées de la figure 33. Les pièces ont été sélectionnées à partir des cellules les plus grosses et de préférence celles qui étaient complétées dans leur cellule respective. Pour la première cellule, on a choisi arbitrairement le produit P005 parmi les autres. Les autres cellules furent associées comme suit : la pièces P012 pour la cellule #3, la pièce P011 pour la cellule #4, la pièce P014 pour la cellule #5 et enfin la pièce P008 pour la cellule #2 car on voulait que l'heuristique associe la pièce P002 à une autre cellule. Le résultat du regroupement est présenté à la figure 34.

			3	5	10	1	8	15	2	6	7	12	13	4	9	11	14
M003	-	1 0.839	1	1													
M005	-	1 0.619		2													
M007	-	1 0.781	2	3													
M014	-	1 0.818		4	3												
M017	-	1 0.814	3						4								
M001	-	1 0.875				1	4		1								
M005	-	2 0.862				2	2	2									2
M006	-	2 0.499	5				1										
M007	-	1 0.878				3		3									
M008	-	1 0.588				4		4									
M017	-	1 0.896				5		6									
M002	-	1 0.721							1				1				
M004	-	1 0.894							2		1	2	2				
M007	-	1 0.867									2	1					
M009	-	1 0.473								4							
M011	-	1 0.868							3	2				1			
M012	-	1 0.851								3							
M014	-	1 0.739															
M019	-	1 0.879							5		4	6	4				
M001	-	1 0.891						1							1		
M004	-	1 0.149													1		
M012	-	1 0.792													3	2	
M013	-	1 0.731				2									2	3	
M015	-	2 0.543													3	4	4
M016	-	2 0.871							5		5				4	5	5
M002	-	1 0.815						5									1
M006	-	1 0.576				1											3
M010	-	2 0.502						3									5
M018	-	1 0.604													2		6
M019	-	1 0.542													5		4

Figure 34 Résultats de la formation de cellules, scénario #7

On remarque rapidement que seul la cellule #5 fut seule à avoir une seule pièce. L'uniformité des cellules s'améliore. Également, les résultats de l'heuristique furent très notables. Par rapport à la meilleure solution trouvée antérieurement (scénario #6), on a obtenu un gain pour tous les critères mentionnés au tableau XVII. En somme, on a fait une économie de 2 machines soit un gain de 413 000 dollars à l'investissement et de 57 110 dollars pour l'estimation des frais annuels et ce, sans compter l'économie d'espace. De plus, la qualité du regroupement fut augmentée de 10%, ce qui est remarquable. Cependant, le nombre de transports intercellulaires a grimpé à 19. Un nombre élevé de transport pourrait causer plusieurs difficultés de gestion des opérations et augmenter le risque d'accidents dû aux divers transports. Ceci ne peut être estimé à ce stade-ci de conception mais la phase de simulation sera très utile pour alimenter en informations ces caractéristiques.

Tableau XVII

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #7

Scénario 7						
Scénario 7		989 999,06	1 510 135,25	1 604 712,00	1 592 743,50	1 222 989,62
						6 920 579,43
		335 252,69	432 450,47	559 301,38	481 403,69	369 632,50
						2 178 040,73
		500	800	800	800	600
						3 500,00
Transferts intercellulaires (TUM=59.9%)		0,86	0,83	0,87	0,76	0,65
						0,79
Transferts intercellulaires (TUM=59.9%)		5	8	8	8	6
						35
Transferts intercellulaires (TUM=59.9%)		Nombre de transports: 19 Coûts additionnels : \$ 54 600.00				

Pour le dernier scénario, quatre cellules furent imposées à l'heuristique. Le but était d'éliminer la cellule #5 qui ne possédait qu'une seule pièce. La pièce P014 fut imposée à la cellule #4 au lieu de la pièce P011 qui était la pièce-clé de cette cellule au dernier scénario. Ce choix est valide puisque la pièce P014 a des opérations communes avec la pièce P004, tout comme la pièce P011 qui fut jumelée avec cette dernière plus d'une fois dans les scénarios précédents. Ainsi, la pièce P011 a moins besoin d'être une pièce-clé que la P014.

Tableau XVIII

Résultats de l'heuristique de formation de cellules, scénario #8

Scénario 8						
Scénario 8		1 695 255,88	1 812 840,50	1 555 542,00	1 609 681,12	
						6 673 319,50
		497 742,84	631 414,56	517 491,66	496 106,03	
						2 142 755,09
		900	900	800	800	
						3 400
		0,77	0,88	0,87	0,76	
						0,82
		9	9	8	8	
						34
Transferts intercellulaires (TUM=59.9%)		Nombre de transports: 19 Coûts additionnels : \$ 52 368.00				

Suite à ces modifications de paramètres, les résultats de l'heuristique furent fort satisfaisants. Le tableau 5.12 résume les résultats de ce nouveau scénario. On remarque que les cellules sont très uniformes avec un nombre de machines presque similaire pour chacune. Avec cette configuration, on obtient un gain supplémentaire à l'investissement

de 247 000 dollars, soit l'économie d'une machine et de ses coûts de fonctionnement. Enfin, comme le scénario précédent, le flux intercellulaire est très présent pour un nombre de 19. Le concepteur devra aussi tenir compte des difficultés de gestion que pourrait encourir ce nombre élevé.

En dépit de plusieurs indicateurs déjà présents, l'étape de simulation n'est pas encore franchis et le risque d'un échec à l'implantation de l'un ou l'autre des scénarios présentés serait élevé si l'on omettait la phase 2 de la méthode de conception. De fait, les données des critères présentés à cette phase ne comprennent pas tous des variables qui prennent en compte certaines fluctuations ou événements stochastiques tels des pannes, des goulots d'étranglement, l'attente d'une ressource de transport, l'impact de la limitation des tampons d'entrée ou encore des défauts de fabrication que la simulation peut prévoir.

Pour compléter la première phase de conception, le concepteur doit faire un choix parmi les meilleurs scénarios générés pour limiter la charge de travail à la simulation et d'éviter de modéliser les scénarios jugés moins favorables à l'avance. Les scénarios #2, #3, #6, #7 et #8 ont été retenus pour leurs avantages économiques à l'exception du scénario #3. Ce dernier, moins avantageux que les autres retenus, fut sélectionné car il représente la moins économique des configurations de cellules autonomes. Cette dernière sélection donne l'avantage de valider en mode dynamique les caractéristiques d'un aménagement de cellules complètement autonomes.

5.5 Phase 2, Simulation

5.5.1 Expérimentation

Pour la phase de simulation, nous avons fixé la durée de la simulation à 240 000 minutes, ce qui équivaut à un an de production. Ce chiffre correspond aux paramètres de production fournis à l'heuristique lors de la formation de cellules. La simulation

permettra à la fois d'extraire les caractéristiques de chaque configuration et de vérifier leur faisabilité en mode dynamique. Par exemple, un manque de ressources machines pourra se traduire par un grand nombre d'entités dans les files d'attente des tampons ce qui demandera une revue du scénario ou encore son rejet de la lice.

La phase de simulation débute par l'édition des bases de données qui puisent en grande partie leur information à partir des résultats et des bases de données de l'heuristique. Pour cette édition, le concepteur doit tout d'abord établir un tableau d'équivalence qui liste le numéro que prendra le type de machine dans chaque cellule. Ce numéro servira d'index pour le vecteur de machine de la base de données tel qu'expliqué au chapitre 3. Le tableau XIX montre cette liste établie pour le scénario #1.

Tableau XIX

Équivalence du numéro de chaque machine par cellule, scénario #1

Cell 1		Cell 2		Cell 3		Cell 4		Cell 5	
101	M001	201	M002	301	M004	401	M001	501	M002
102	M002	202	M004	302	M007	402	M004	502	M005
103	M003	203	M011	303	M014	403	M006	503	M006
104	M005	204	M017	304	M016	404	M011	504	M010
105	M007	205		305	M018	405	M012	505	M019
106	M008	206		306		406	M013	506	M020
107	M017	207		307		407	M014	507	
108		208		308		408	M015	508	
109		209		309		409	M016	509	
110		210		310		410	M019	510	

Ensuite, la démarche suivante doit être soigneusement respectée pour chaque scénario :

- a. Éditer les bases de données relatives à chaque cellule comprenant la capacité des machines, le taux de rejet, le MTTR et le MTBF;

- b. Dans le réseau principal, ajuster la capacité de chaque tampon et changer le nom des fichiers de lecture;
- c. Éditer la matrice des distances entre les cellules;
- d. Éditer le fichier du plan de production contenant les types de produits, leur demande hebdomadaire, leur séquence de production et leur temps de fabrication;
- e. Finalement, éditer les fichiers de données pour la flexibilité de routage comprenant le numéro de machine et le temps d'opération pour chaque opération des produits.

Par ailleurs, comme il a déjà été mentionné dans les cas où l'heuristique proposait de partager la demande d'une opération sur 2 machines (par exemple, P001_OP002 : 25 % sur M011 et 75 % sur M018), nous attribuons la totalité de la demande sur celle possédant le plus fort pourcentage. L'autre machine sera placée en alternative de routage dans le premier fichier de données relatif à la flexibilité. Outre cette modification, nous avons établi le taux de rejet relatif à chaque machine par cellule au lieu d'être relatif à l'opération pour des raisons de simplification de modélisation. Étant donné que ce taux risque de varier très peu d'une opération à une autre sur une même machine, on juge acceptable cette limitation. Ainsi, ce taux sera calculé en prenant la moyenne des taux par opération pour le type de machine par cellule. Au niveau des bases de données, seul le fichier des distances entre les cellules restera inchangé pour tous les cas afin de ne pas faire intervenir la problématique d'aménagement à ce stade de conception.

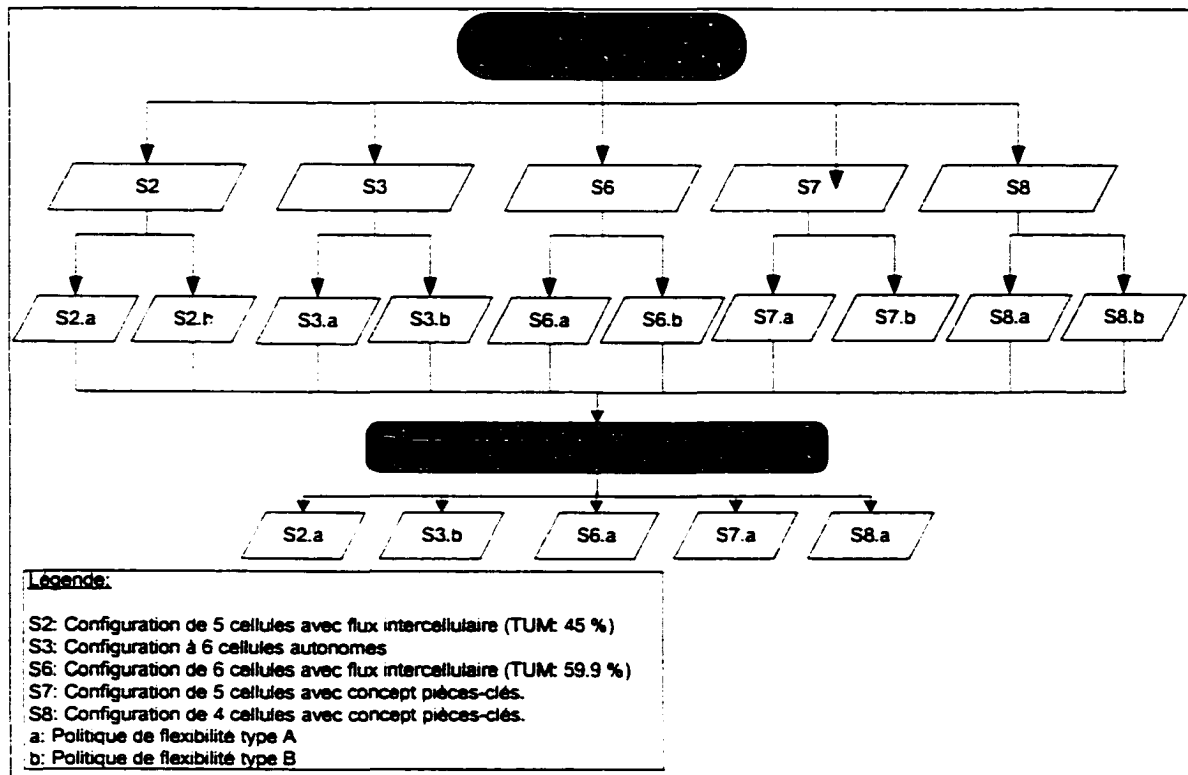


Figure 35 Scénarios possibles pour la phase de simulation

Nous présentons dans les lignes qui suivent une brève observation du passage à la simulation des scénarios retenus. L'expérience a été menée sur un ordinateur personnel avec processeur Pentium III, 850 MHz assisté d'un système d'exploitation *MS Windows Me*. Chaque simulation prit environ 7 minutes pour compléter une année de production.

Scénario S2:

Ce scénario issu du premier scénario initial de la phase 1 est une configuration composée de 5 cellules avec flux intercellulaires. Le problème de partage des opérations sur plus d'une machine proposé par l'heuristique est présent à quatre reprises dans cette configuration. À la cellule #3, le produit P007 avait 2 opérations partagées. L'opération #1 fut assignée au complet à la machine M005 (302) et l'autre machine (M004, 301) fut désignée comme la première alternative de routage. De même, l'opération #3 fut

assignée à la machine M014 (304) et l'autre machine prévue (M004, 301) fut insérée en alternative de routage. Dans la cellule #4, l'opération #3 du produit P013 fut assignée sur M015 (407) et M014 (406) fut désignée comme alternative de routage. Enfin, l'opération #5 du produit P004 fut attribuée à M019 (505) et M006 (503) fut désignée comme alternative de routage. Pour le présent scénario et les autres, les capacités des ressources tampons ont été établies à 3 espaces par ressource processeur, c'est-à-dire, si le type de machine M006 (503) est au nombre de 3 dans la cellule #5, la capacité de son tampon sera fixée à 9 espaces tampons (ressources) dans le modèle de simulation. Du côté des ressources de transport, la capacité a été fixée à 10 ressources de façon exagérée afin de valider le nombre maximal utilisé. Dans les cas où les résultats indiquent que ce nombre est insuffisant, ce dernier fut revu à la hausse.

Scénario S3:

Obtenu avec de nouveaux paramètres de conception, le troisième scénario composé de 6 cellules autonomes (sans flux intercellulaire au niveau de la matrice de regroupement) a subi 3 modifications de séquences d'opération à cause du problème de partage. Telles qu'expliquées au scénario précédent, les modifications furent faites aussi pour les opérations #3 du produit P015 (cellule #1), #1 du produit P007 (cellule #3) et #4 du produit P013 (cellule #3).

Scénario S6:

Dérivé du scénario S3, le scénario S6 ajoute le flux intercellulaire avec un taux d'utilisation minimale des processeurs le plus sévère ($TUM=59.9\%$). La configuration comprend 6 cellules où les modifications de séquences d'opérations étaient requises pour les produits P005 (opération #4, cellule #1), P015 (opération #3, cellule #1) et P007 (opération #3, cellule #3).

Scénario S7:

Comme déjà présenté à une section précédente, ce scénario hérite de la connaissance des désavantages de ces prédécesseurs. Il a été généré à l'aide du concept de pièces-clés avec flux intercellulaire où 5 cellules comprenant chacune une pièce spécifiée furent imposées l'heuristique par le concepteur. Les modifications requises pour la simulation ont été faites dans la cellule #3 pour la pièce P007 (opération #3) et la pièce P013 (opération #4).

Scénario S8:

Dérivé du scénario S7, le scénario S8 réduit d'une cellule (4 cellules) la configuration avec flux intercellulaire. Cinq modifications des séquences d'opération furent faites respectivement aux pièces P005 (opération #3, cellule #1), P015 (opération #2, cellule #1), P007 (opération #3, cellule #2), P015 (opération #1, cellule #2) et P001 (opération #2, cellule #4).

Pour chacun de ces scénarios, on a appliqué deux politiques différentes de flexibilité de routage. Par conséquent, détenant maintenant le double de scénarios pour un total de dix (10), il incombait de faire une autre élimination scénarios afin de passer à l'analyse AHP avec un nombre plus limité d'alternative. Cette opération représente implicitement un nouveau filtre inséré entre la phase de simulation et celle de l'analyse multicritère. On prendra la meilleure politique pour chacun des scénarios. Les résultats de l'étape de simulation pour les critères présentés au chapitre 4 sont résumés au tableau XX. Un exemple du fichier sommaire de résultats d'un scénario est fourni en annexe 4.

Tableau XX

Résultats de la phase de simulation

Critères	S2A	S2B	S3A	S3B	S6A	S6B	S7A	S7B	S8A	S8B
Equipement (nombre)	6	6	4	3	8	9	10	9	9	8
Equipement Stockage (nombre)	34	33	33	33	40	39	42	43	40	40
En cours (minutes)	40	39	42	41	44	44	45	46	44	45
Temps dans le pipeline (min)	113.4	113.5	118.2	117.9	131.3	131.6	125.9	126	125.9	126.4
Temps de cycle (min)	61.8	61.9	61.8	61.7	61.7	61.8	61.6	61.7	61.7	61.8
Taux d'occupation processus (%)	68.105	68.089	58.532	58.528	67.831	67.776	71.210	71.662	73.660	73.700
Temps de Transports (min)	210687	209836	4172	2936	376528	375068	523020	522961	381707	381995
Nombre de rejets (nombre)	2570	2584	2527	2522	2492	2502	2438	2436	2502	2521
Temps de pannes (min)	76026	76026	113766	113766	60262	60262	76163	76163	70875	70875
Meilleures alternatives:	S2A		S3B		S6A		S7A		S8A	

On remarque que plusieurs critères ont obtenu des résultats similaires où l'on constate que les politiques de flexibilité ont peu d'effet si elles sont appliquées sur une même configuration. Malgré tout, l'application des politiques a su montrer quelques différences permettant de sélectionner la meilleure politique pour chaque scénario retenu. Pour effectuer ce filtre, les critères n'ont pas été pondérés. Les comparaisons ont été faites entre les deux politiques pour chaque scénario par un marquage des cases. Par exemple, pour le scénario #2, le critère équipement de stockage fut favorable avec la politique B. La case avec le nombre 33 fut marquée. Par conséquent, ce dernier scénario a obtenu un meilleur score (4 cases marquées contre 3) pour l'application de la politique B. Pour le scénario #3, la politique B s'est nettement imposée en obtenant de meilleurs résultats sur six critères. Pour les scénarios #6, #7 et #8, la politique A fut favorable tels que le montre le tableau. Un seul fait à noter, la politique de flexibilité n'a aucun effet sur le temps de pannes. Ceci confirme que nous n'avons pas modélisé les pannes en tenant en compte de l'effet du taux d'occupation d'une machine. Dans ces dernières

conditions, il y aurait eu différence entre deux politiques car le taux d'occupation d'une machine influence directement le temps moyen entre deux pannes. Ainsi, plus une machine est occupée plus sa probabilité de tomber en panne sera élevée.

5.5.2 Validité du modèle de simulation

La validation des résultats d'un modèle de simulation se fait habituellement à l'aide de ceux d'un modèle mathématique ou encore à l'aide de données réelles. Dans le premier cas, il serait difficile d'élaborer un modèle mathématique pour une configuration de 15 produits visitant 40 processeurs ou postes de travail au total. De plus, l'élaboration d'un tel modèle ne pourrait fournir autant de détails que la simulation le permet. Dans le cas de la comparaison avec des données réelles, cette alternative se révélerait la meilleure, mais demanderait une période de temps considérable pour la collecte des données. À défaut de n'avoir le temps pour effectuer une telle comparaison en milieu industriel, la demande hebdomadaire et le taux d'occupation des processeurs peuvent, en revanche, représenter des indicateurs utiles à cette fin.

Le tableau XXI présente la comparaison des résultats de la production hebdomadaire simulée avec la demande hebdomadaire prévue (voir section 3.3.4) pour les scénarios S7B et S8A. On observe que la moyenne des différences des taux de production tend vers 0 % ce qui valide bien l'exécution du modèle de simulation.

Tableau XXI

Comparaison de la demande prévue et la demande simulée.

		Scénario S7B		Scénario S8A	
P001	76,8	77,28	0,63%	76,40	-0,52%
P002	76,8	77,18	0,49%	77,48	0,89%
P003	67,2	68,44	1,85%	68,30	1,64%
P004	86,4	86,72	0,37%	86,28	-0,14%
P005	96	95,72	-0,29%	95,84	-0,17%
P006	86,4	86,74	0,39%	86,10	-0,35%
P007	67,2	67,92	1,07%	67,64	0,65%
P008	86,4	87,30	1,04%	87,60	1,39%
P009	67,2	66,42	-1,16%	66,48	-1,07%
P010	76,8	77,74	1,22%	77,70	1,17%
P011	86,4	85,76	-0,74%	85,32	-1,25%
P012	67,2	66,60	-0,89%	66,58	-0,92%
P013	65,28	65,32	0,06%	65,96	1,04%
P014	92,16	91,02	-1,24%	91,46	-0,76%
P015	86,4	85,42	-1,13%	85,36	-1,20%
Moyenne					

Par ailleurs, le taux d'occupation moyen des processeurs est un autre indicateur qui permet de valider le modèle de simulation et de vérifier les estimés de l'heuristique. Le tableau XXII à la page suivante présente cette comparaison, pour le scénario S8A, avec les taux d'occupation des processeurs estimés par l'heuristique (phase I) et ceux calculés par le modèle de simulation (phase II). On observe à ce tableau que la différence moyenne était de l'ordre de - 1 % ce qui satisfait les estimés de l'heuristique. Mais on observe aussi qu'il y a des différences importantes pour certaines machines. Ces différences sont à la fois négatives et positives si l'on prend comme exemple les machines M003 (-23,23%) et M007 (22,59%), respectivement.

Tableau XXII

Comparaison du taux d'occupation des machines estimé et celui simulée.

Scénario S8A			
Cellule #1			
M002 (101)	69.80%	57.85%	-17.12%
M003 (102)	66.30%	50.90%	-23.23%
M005 (103)	87.80%	99.40%	13.21%
M007 (104)	81.00%	99.30%	22.59%
M008 (105)	49.50%	49.10%	-0.81%
M017 (106)	73.60%	72.65%	-1.29%
Cellule #2			
M001 (201)	83.10%	68.70%	-17.33%
M004 (202)	88.00%	89.30%	1.48%
M006 (203)	89.90%	89.20%	-0.78%
M007 (204)	64.30%	64.80%	0.78%
M009 (205)	86.00%	85.80%	-0.23%
M010 (206)	70.60%	70.50%	-0.14%
M011 (207)	86.80%	86.10%	-0.81%
M012 (208)	79.30%	92.90%	17.15%
M014 (209)	65.20%	60.90%	-6.60%
Cellule #3			
M006 (301)	88.20%	87.00%	-1.36%
M012 (302)	79.60%	78.25%	-1.70%
M013 (303)	73.10%	71.60%	-2.05%
M015 (304)	65.90%	64.65%	-1.90%
M016 (305)	87.10%	85.40%	-1.95%
Cellule #4			
M001 (401)	72.20%	70.90%	-1.80%
M003 (402)	64.00%	83.80%	30.94%
M005 (403)	81.50%	61.50%	-24.54%
M007 (404)	83.80%	83.00%	-0.95%
M010 (405)	52.80%	52.00%	-1.52%
M017 (406)	63.80%	63.70%	-0.16%
M018 (407)	81.00%	79.50%	-1.85%
M019 (408)	44.30%	43.70%	-1.35%

On peut expliquer ces grandes différences par le fait que l'heuristique propose parfois de séparer la production d'une opération sur plus d'une machine (voir annexe 3, cellule #1, section affectation des opérations). Or, la simulation implique pour sa part l'édition d'un fichier de plan de production qui inclut les séquences de production où une seule machine par opération est permise. Tel que mentionné à la section 5.5.1, pour contrer ce problème de partage de la charge de production lors de l'édition du fichier du plan de production à la phase II, on dédit la totalité de la charge à la machine possédant le pourcentage le plus élevé, ce qui aura forcément pour effet d'augmenter son taux d'occupation. Par exemple, dans le fichier de résultats de l'heuristique pour le scénario S8A (annexe 3), on avait dans la cellule #1 l'opération # 2 (OP002) du produit #15 (P015) qui partageait sa charge de production sur les machines M003 (40%) et M005 (60%). Pour la simulation, on a donc dédié la totalité de la charge à M005 puisqu'il possédait déjà 60 %, soit 20% de plus que M003. Cette dernière machine (M003) a ensuite été déclarée comme première alternative de routage dans le fichier relatif au processus de flexibilité pour assurer sa disponibilité pour l'opération #2 en cas de besoin de capacité de production. On remarque donc que ce transfert a affecté le taux d'occupation de M005 avec une augmentation de l'ordre de 13 % et diminué le taux d'occupation de M003 de l'ordre de 23 %. Cet argument est aussi valide pour les grandes différences observées aux autres machines telles que M007 et M002 de la cellule #1 qui étaient des machines dédiées par l'heuristique à l'opération #3 du produit #5 (annexe 3).

L'effet du processus de flexibilité de routage intégré à la simulation (section 3.3.8) peut aussi être responsable de la différence des taux d'occupation, mais son effet demeure faible en comparaison à l'argument précédent et plus difficile à analyser. Par exemple, la machine M007 de la cellule #2 se retrouvait souvent dans les fichiers de flexibilité de routage mais n'a eu qu'une augmentation de 0,78 % ce qui démontre le faible effet des changements de routages des pièces sur le taux d'occupation des processeurs. De plus, on a observé l'effet inverse avec la machine M016 qui n'avait aucune présence dans les

fichiers de la flexibilité de routage. Son taux d'occupation fut diminué de seulement 1,95% dû en partie à l'effet du transfert de certaines de ses opérations vers d'autres machines.

On observe enfin que ces différences s'ajusteront à l'échelle globale du système de production comme le démontre le résultat de la moyenne pondérée (-0.77%). On peut donc conclure que le modèle de simulation complète bien la demande prévue et que le taux moyen d'occupation des machines est représentatif des calculs exécutés par l'heuristique. En dépit de ces bons résultats, il se pourrait que les différences observées soient aussi influencées par d'autres causes. Par exemple, le temps de réchauffement du système lors du début de la simulation pourrait avoir un rôle à jouer dans les résultats. Le concepteur ne doit pas négliger cette période. Suite à des expériences faites dans cette étude à l'aide du modèle générale de simulation, nous proposons, afin d'éliminer l'instabilité du système présente lors du démarrage, une durée de 1 à 2 semaines de production comme période de réchauffement. Cette période pourrait ainsi éliminer les données générées durant l'instabilité que connaît le système au départ et aider à fournir de meilleurs résultats. Une deuxième cause pourrait être la transformation du temps inter-arrivée des produits au système en imposant une fonction de distribution pour insérer de la fluctuation sur la demande. Tel que déjà cité dans ce mémoire, cette fluctuation n'est pas prise en compte par l'heuristique.

5.6 Phase 3, Analyse Multicritère

Cette dernière section concerne le choix décisif de la solution à implanter. L'analyse AHP est faite sur le logiciel *Expert Choice*, version 9.5. La pondération des critères et des sous-critères est faite dans un premier temps. La comparaison des alternatives par rapport à chacun des sous-critères est ensuite effectuée. Enfin, la synthèse des résultats est appuyée d'une analyse de sensibilité pour renforcer la prise de décision.

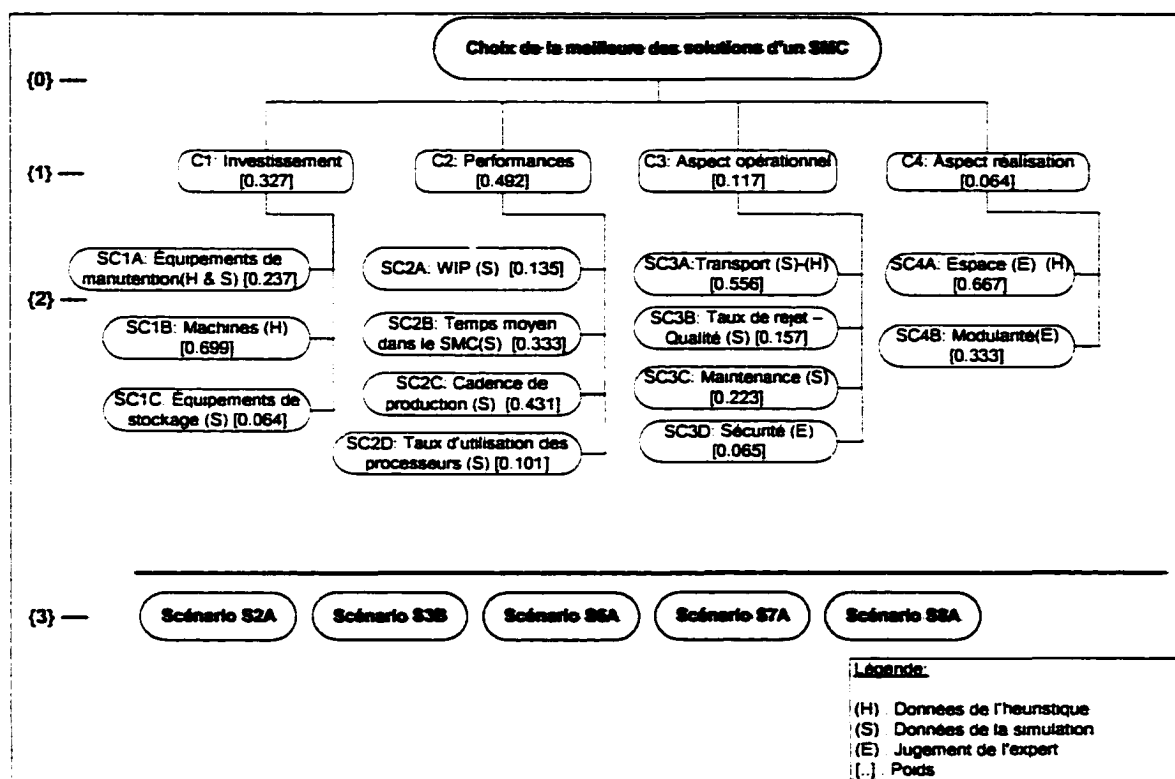


Figure 36 Structure hiérarchique de l'analyse multicritère, cas d'application

5.6.1 Pondération des critères et des alternatives

La figure 37 représente une synthèse des poids des critères qui a été obtenue par comparaison entre les individus du premier niveau de la hiérarchie. Nous avons donné plus d'importance au critère «Performances» en comparaison au critère «Investissement» car un système de production plus performant et légèrement plus coûteux qu'un autre serait préféré selon notre jugement. Le fait de rejeter un système plus coûteux (mais plus performant) pourrait compromettre des gains à long terme. Pour le critère «Aspect opérationnel», nous l'avons jugé plus important que le critère «Aspect réalisation» mais inférieure aux deux premiers. Nous avons jugé le dernier critère plus bas que les autres pour le caractère un peu plus intangible de ses sous-

critères. Une légère incohérence se dégage des jugements mais cette dernière a été jugée négligeable (< 0.10) par rapport à l'échelle de Saaty.

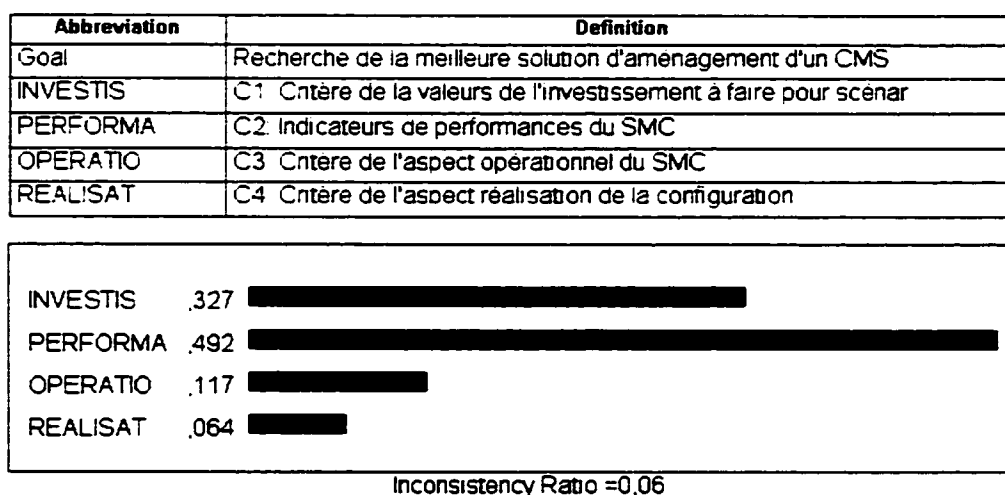


Figure 37 Synthèse du vecteur de priorité pour le premier niveau de critères

Au deuxième niveau de la hiérarchie, on retrouve les sous-critères qui sont comparés entre eux par rapport à leur critère parent respectif. La figure 38 montre le vecteur priorité des sous-critères du critère «Investissement» où on a jugé que le sous-critère «Machines» est le plus important car ces équipements représentent un coût d'investissement beaucoup plus élevé que les deux autres type d'équipement.

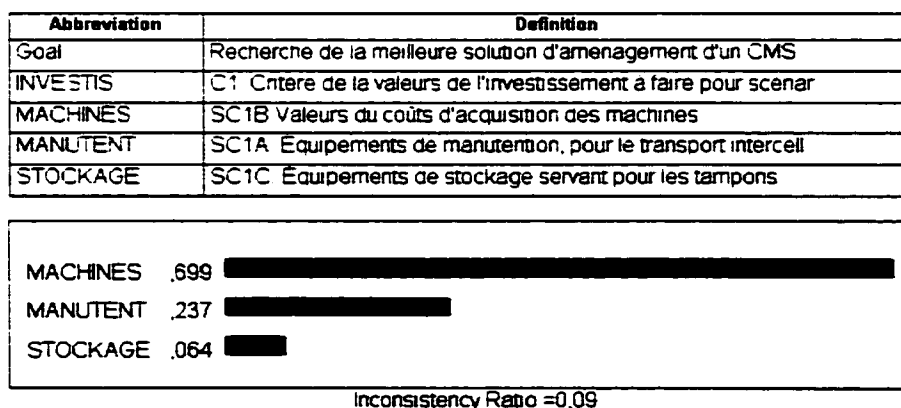


Figure 38 Synthèse des poids des sous-critères du critère «Investissement»

À la figure 39, les sous-critères du critère «Performances » sont dominés par le sous-critère «Cadence » mais cela peut changer d'un concepteur à un autre ou encore d'une politique d'entreprise à une autre. En effet, si la priorité est mise sur la disponibilité des produits la cadence sera favorisée comme il est mentionné ici. Par contre, si la plupart des processeurs sont très coûteux, il est fort possible que le concepteur accorde plus de poids au sous-critère «TAUX MAC ».

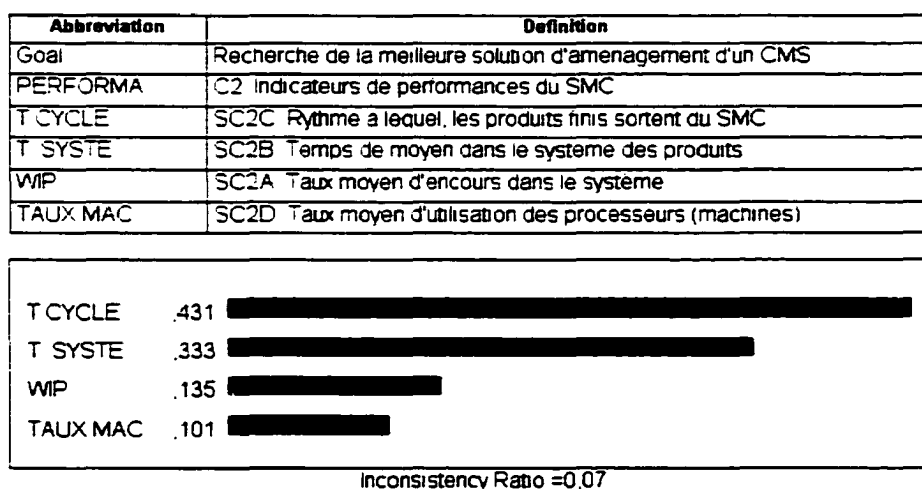


Figure 39 Synthèse des poids des sous-critères du critère « Performances »

La figure 40 illustre le vecteur priorité pour les sous-critères du critère «Aspect opérationnel ». Représentant la difficulté de gestion du flux intercellulaire, le sous-critère «Transport» a été jugé supérieur aux autres pour son impact direct sur les opérations de production. Nous avons jugé que la qualité et la sécurité méritaient moins d'importance vu que le cas d'étude vise des machines à usiner de haute gamme dont le taux de rejet est très bas pour la plupart d'entre elle.

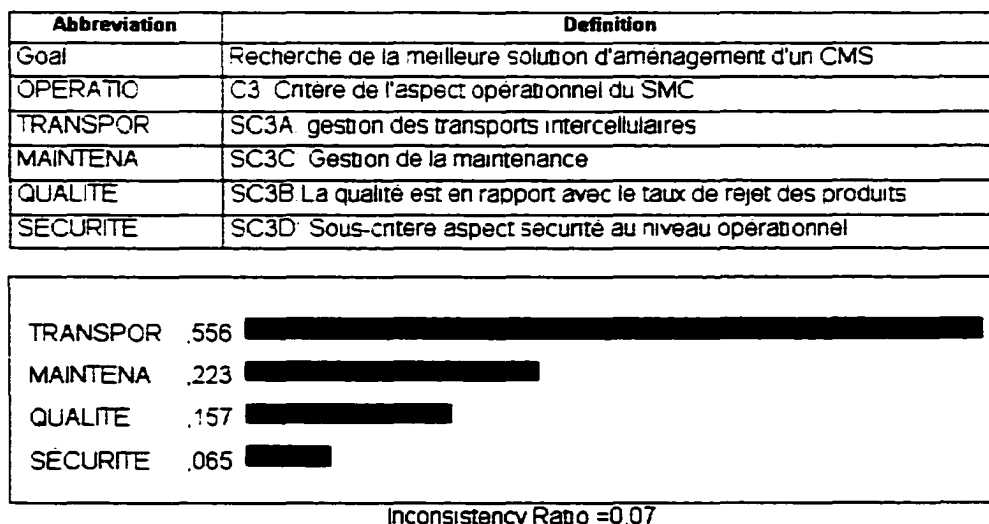


Figure 40 Synthèse des poids des sous-critères du critère « Aspect opérationnel»

Les derniers sous-critères à être comparés sont ceux du critère «Aspect opérationnel». La figure 41 présente la pondération qui donne plus de poids au facteur de la superficie requise (Espace) que celui de la modularité au changement (Modularité).

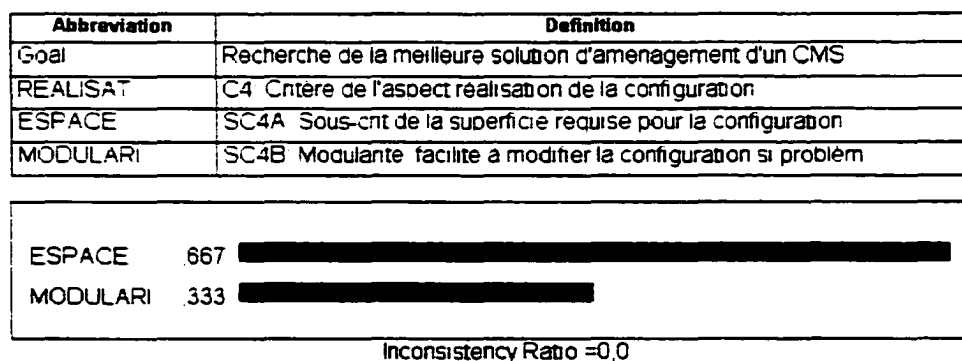


Figure 41 Synthèse des poids des sous-critères du critère «Aspect réalisation»

Suite à la pondération de chaque alternative par rapport à chacun des critères, la synthèse globale des poids est obtenue tel qu'illustrée à la figure 42. Cette synthèse montre le rang de chaque alternative de solution de SMC proposée. On remarque un ratio global d'incohérence de 0,07 ce qui est négligeable selon la règle de Saaty (ratio inférieur à 0,10). Cette incohérence est due à la pondération qualitative des critères et des sous-

critères ainsi que celles des alternatives par rapport aux critères «Transport», «Sécurité» et «Modularité». Les résultats nous démontrent que le scénario #3 avec la politique B possède le meilleur score global avec un poids de 0.254. Cette configuration de 6 cellules est la seule à ne pas permettre le flux intercellulaire dans la séquence initial de production. Ceci démontre bien les avantages que peut posséder une configuration de cellules autonomes, car elle dépasse les autres largement. En seconde position, nous obtenons le scénario S8A de 4 cellules qui avait été classé la meilleure configuration à la phase de l'heuristique ce qui confirme sa supériorité dans les configurations avec flux intercellulaire. Enfin, le plus mauvais score va au scénario S6A qui pourtant avait générer avec un sévère taux d'utilisation minimal des processeurs une configuration plus économique et un meilleur regroupement des machines.

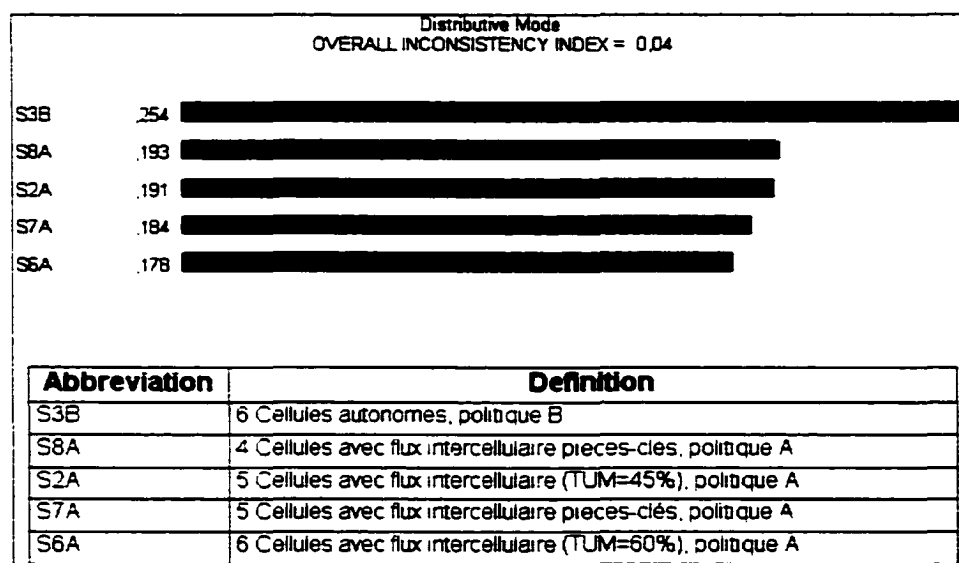


Figure 42 Synthèse des poids des alternatives de solution, analyse AHP

5.6.2 Analyse de sensibilité et proposition de système

L'analyse de sensibilité permet de valider la robustesse de la décision du concepteur. Cette dernière étape permet de bien juger si l'alternative de solution détenant le premier rang pourrait être devancée par une autre solution en revoyant légèrement les poids des

critères principaux. La figure 43 représente le graphique de performance des alternatives de solution par rapport aux critères principaux. À l'aide des courbes des alternatives, on remarque rapidement où le scénario S3B a récolté ses meilleurs scores (critères « Investissement » et « Opération »). On peut aussi déterminer par une simple analyse de ce graphe que la pire alternative de solution (S6A) ne peut devenir première en revoyant la pondération puisque sa courbe se maintient en tout temps sous celles de S2A, S3B et S8A. Évidemment, il importe de vérifier pour les autres alternatives en lice quel effet aura la variation du poids de certains critères sur leur classement final. Le concepteur pourra valider, par cette analyse de sensibilité, si le fait de varier le poids de certains critères dominants met en doute le choix final et de même, pourra appréhender l'effet de l'ajout d'un nouveau critère dans l'analyse. Ainsi, plus l'avance du meneur (S3B) sera menacée par les variations des poids des critères ciblés, moins son choix comme solution sera robuste.

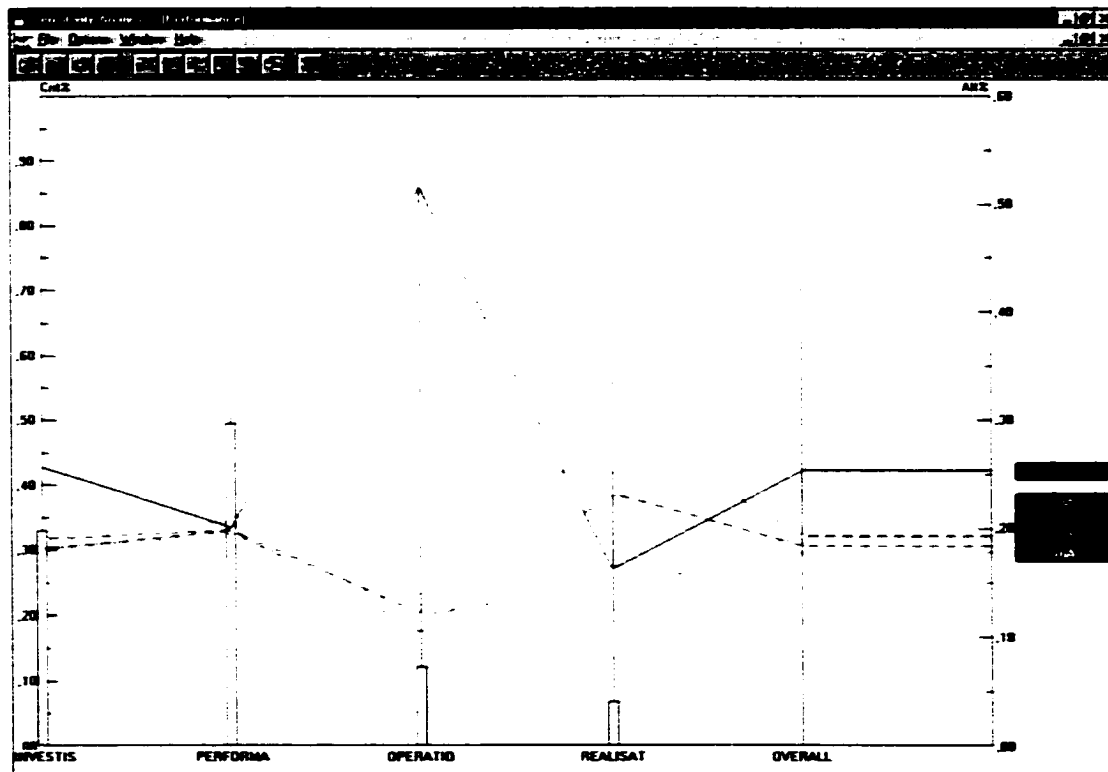


Figure 43 Synthèse graphique des résultats, logiciel *Expert Choice*.

Alors, étant donné la forte avance du scénario S3B aux critères « Investissement » et « Opération », l'analyse de sensibilité a été faite sur les deux autres critères restants. Tout d'abord, l'analyse de sensibilité du critère « Performance » montre qu'il faut augmenter ce critère d'au moins 45 % afin de faire déplacer le scénario S3B par le scénario S2A. On remarque à la figure 44 qu'en déplaçant la ligne de pondération de 0.49 à 0.96 (trait bleu pointillé), qu'il faut une très grande variation de poids pour déplacer S3B. Ainsi, le concepteur devra donner beaucoup trop d'importance au facteur performance du SMC, soit doubler le poids initial de ce critère, afin d'obtenir un nouveau classement (avec S2A comme meneur). Cette observation permet d'affirmer que le premier choix (S3B) demeure fiable comme alternative de solution.

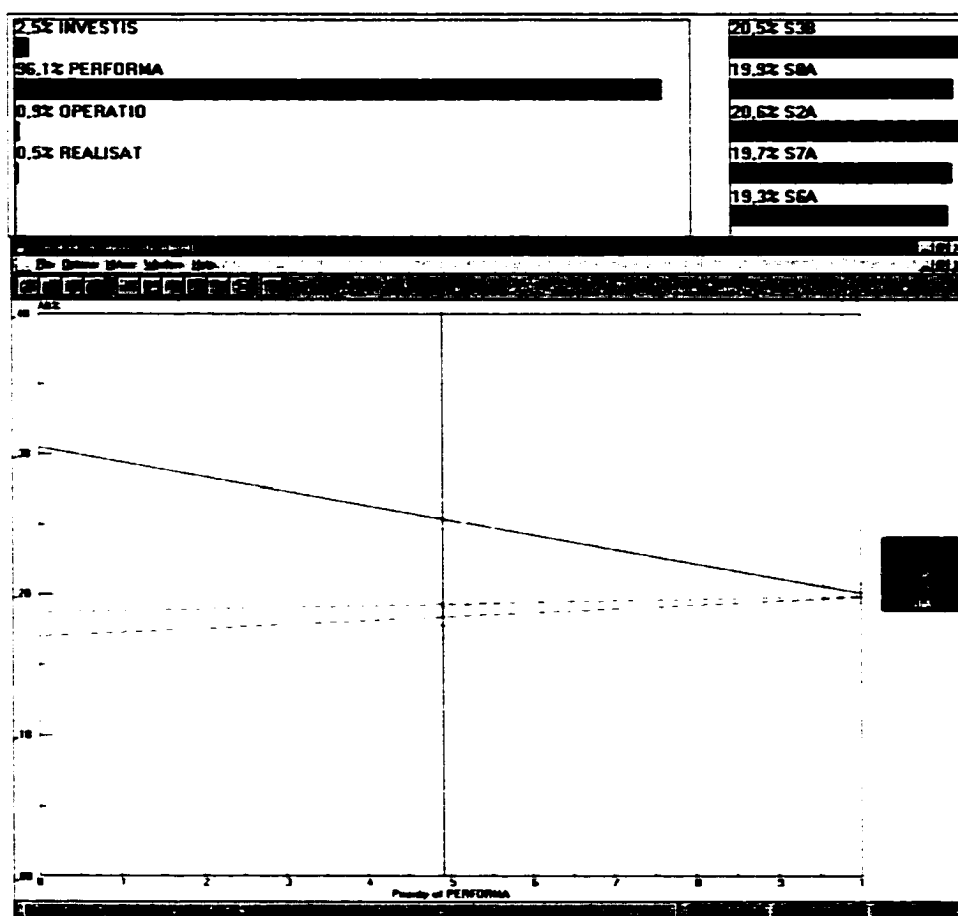


Figure 44 Modification du poids du critère « Performance ».

En appliquant la même analyse et en donnant plus de poids au critère «Réalisation», nous observons qu'il faut une variation positive de l'ordre de 29 % pour déplacer S3B par S8A. La figure 45 illustre qu'en déplaçant la ligne rouge de pondération de ce critère de 0.06 à 0.36 (trait pointillé bleu), il faut une trop grande variation de poids pour déplacer S3B par son plus proche rival. À nouveau ici, il faudra accorder beaucoup trop d'importance à l'aspect réalisation du SMC (soit multiplier ce critère par 6) afin d'obtenir un nouveau meneur au classement des alternatives. Cette deuxième analyse offre au concepteur un deuxième point de vue sur la confiance d'opter pour S3B.

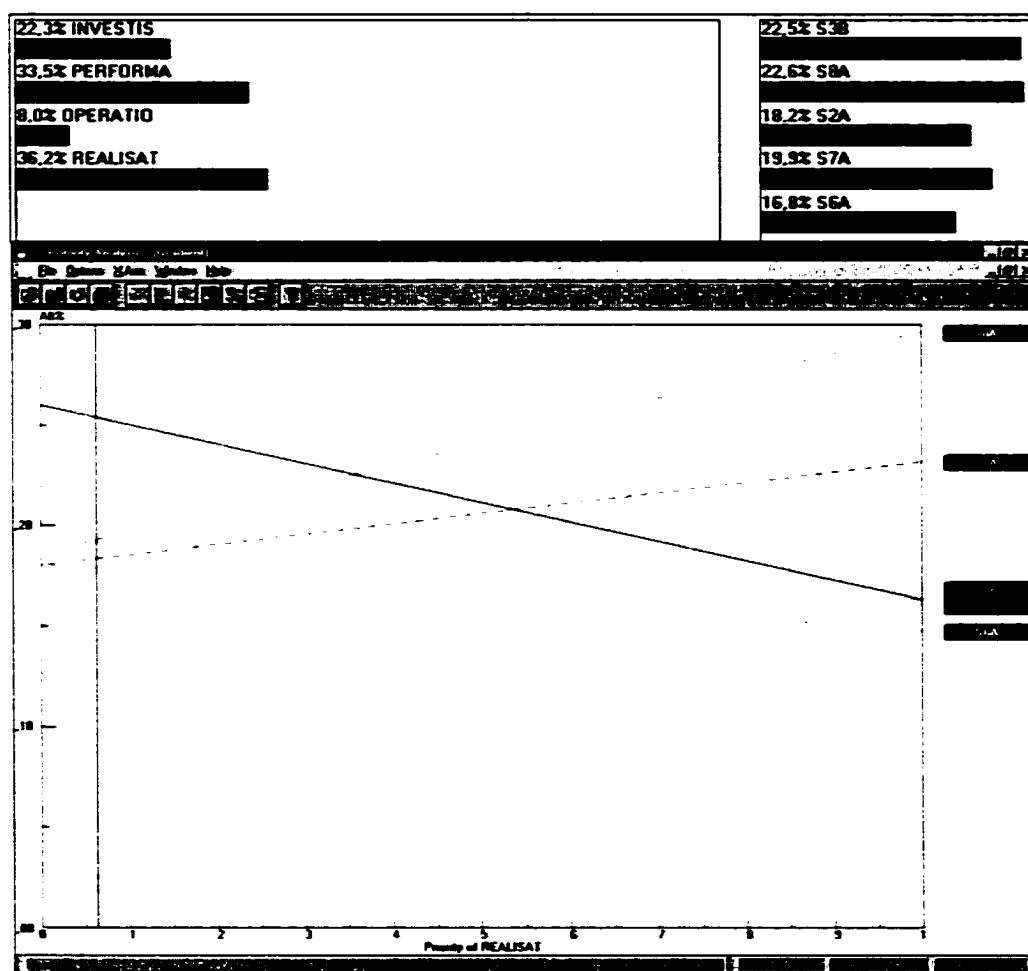


Figure 45 Modification du poids du critère «Réalisation».

Ces observations prouvent que de choisir l'alternative de solution S3B représente un choix robuste. Notre décision finale est le scénario S3B qui représente une configuration de cellules autonomes avec une politique de flexibilité de routage de type « B ».

5.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une application de la méthodologie de conception de SMC avec un exemple de problème de production réaliste tout en expliquant plus en détails certaines particularités de l'outil d'aide à la décision. Une description du cas pratique et des stratégies de scénarios en deux étapes ont été présentées. Les phases d'heuristique et de simulation ont été démontrées successivement avec leurs résultats. L'analyse AHP a démontré qu'elle pouvait faire efficacement une synthèse avec les résultats des deux premières phases de la méthode et proposer clairement une solution correspondant à nos critères de sélection, qu'ils soient pondérés qualitativement ou quantitativement. Afin de vérifier la robustesse de la décision proposée par l'analyse AHP, une analyse de sensibilité a été effectuée pour conclure la méthode de conception présentée dans ce mémoire.

CONCLUSION

Ce mémoire résume les activités de recherche pour l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour la conception de systèmes manufacturiers cellulaires. Cet outil est composé d'un processus de trois étapes : une heuristique de formation de cellules, un modèle général de simulation et une analyse multicritère. Le choix des méthodologies fut présenté et justifié. D'abord, l'heuristique adoptée, même si insuffisante pour effectuer un choix réaliste de configuration, tenait compte de plusieurs facteurs qui contrôlent un système de production. En dépit des bonnes estimations qu'elle effectuait, il fallait trouver un moyen d'évaluer les configurations sous des conditions plus proches de la réalité. De telles conditions pouvaient être l'apparition de pannes aléatoires, la variation de la demande dans le temps, l'effet des rejets sur les performances du système, l'effet d'une politique d'ordonnancement, etc. Pour estimer les performances d'un scénario de configuration soumis à de tels événements, il fallait trouver un outil qui permettrait de représenter la réalité pour un horizon de planification donné. En d'autres mots, un outil qui pourrait tenir compte à la fois d'un très grand nombre d'équipements et de produits.

Ce mémoire a ainsi présenté un modèle général de simulation qui possède l'avantage d'être réutilisable pour plusieurs scénarios de SMC par le biais d'un changement de fichiers de données. Le modèle contenant cinq sous-réseaux pour représenter les cellules peut contenir jusqu'à dix types de machines par cellule ce qui en fait un système flexible pouvant s'ajuster à un nombre très élevé de types de configuration. Il a été démontré que cet outil pouvait simuler en quelques minutes la fabrication annuelle de plusieurs produits nécessitant parfois jusqu'à huit opérations de production et dont la demande hebdomadaire se situait aux environs de cent (100) items. De plus, ce modèle a démontré qu'il pouvait tenir compte des événements stochastiques tels les pannes et les rejets et ce, indépendamment du plan de production. Un des avantages du modèle cité dans ce mémoire est la capacité de ce dernier à réagir à un manque de capacité de production. En effet, des sous-routines ont été mises en place pour appliquer les

procédures de sélections d'alternatives de routages où un nouveau processeur et son temps de production sont assignés à l'opération en cause.

Pour compléter la présentation de l'outil, l'analyse multicritère AHP a prouvé qu'elle représentait une bonne option, car le choix d'un bon système de production fait toujours intervenir des critères qualitatifs qui seront jumelés aux critères quantitatifs. Les critères et les sous-critères relatifs à cette analyse furent décrits et ensuite démontrés qu'ils représentaient des critères de décision clés pour le bon choix d'un SMC. Nous avons démontré à l'aide d'un exemple que les trois étapes de la simulation pouvaient fournir de bons résultats et qu'elles permettaient de faire un choix judicieux pour un problème réel de conception d'un système de production.

Pour développer d'avantage cette méthode de conception de SMC, plusieurs travaux de recherche ou de projets d'études pourraient être mis de l'avant. Tout d'abord, l'heuristique présentée est programmée dans une vieille version de C++ compilé pour *MS DOS*. Il serait intéressant de revoir le code, de la faire migrer vers une nouvelle version de langage C++ tel que *MS Visual C++* permettant ainsi l'utilisation de l'outil sur la nouvelle génération de plates-formes *MS Windows*. Par la même occasion, il serait intéressant de revoir les fichiers de sorties et de les adapter aux fichiers de données du modèle de simulation où une fonction d'appel du simulateur serait incluse. Ce dernier point est très important, car la création des fichiers de données pour la simulation représente une tâche laborieuse de plusieurs heures par scénario. Il faudrait donc automatiser le transfert de données entre l'heuristique et le modèle général de simulation. Du côté de ce dernier, le modèle général ne prévoit pas de ressources humaines où l'effet des changements de quart de travail ferait intervenir de nouveaux événements. Cet ajout apporterait des données supplémentaires au modèle et permettrait d'inclure les temps de mise en course. Aussi, les sous-routines relatives à la flexibilité de routage pourraient être revues pour insérer un plus grand nombre de règles d'ordonnancement.

Il serait intéressant de valider notre modèle de simulation avec une analyse de cas réel. Cette dernière proposition représenterait un travail de taille puisque la collecte de données représente la tâche la plus laborieuse d'un projet de conception en milieu industriel.

Enfin, une dernière piste de recherche ciblerait les stratégies de formation de cellules. Nous avons vu que la phase I faisait intervenir le concepteur où un grand nombre de paramètres pouvaient être contrôlés pour orienter la génération de bons scénarios de SMC. Cette tâche de conception s'avère souvent laborieuse, car le concepteur doit faire beaucoup de générations et d'analyses avant d'arriver à un bon scénario. L'idée d'insérer des plans d'expériences à la phase I pour déterminer les meilleures données de paramètres en fonction des caractéristiques du problème à traiter peut représenter un défi intéressant. Il pourrait constituer à la fois un projet de recherche pour des études supérieures et une contribution pour l'outil développé ici.

ANNEXE 1

Fichiers de contrôle et de sous-routines en C du modèle de simulation.

Fichier de contrôle :

```
//
GEN,"R GAGNE","PMAITRISE Scénario S3", AOUT 2002,1,YES,YES;
LIMITS,1,6,3,15,14,3;
MONTR,CLEAR,4800;

=====
: Declaration des equivalences:
=====
:
: Equivalence srib
EQUIVALENCE,{{TYPEPROD,STRIB[0]}};
:
: Equivalence atrib
EQUIVALENCE,{{TEMPOP1,ATRIB[1]}, {TEMPOP2,ATRIB[2]}, {TEMPOP3,ATRIB[3]}, {TEMPOP4,ATRIB[4]}, {TEMPOP5,
ATRIB[5]}, {TEMPOP6,ATRIB[6]}, {TEMPOP7,ATRIB[7]}, {TEMPOP8,ATRIB[8]}, {TIA,ATRIB[9]}, {DEMPROD,ATRIB[10]},
{TEMPTRANS,ATRIB[11]}, {MTBF,ATRIB[13]}, {MTTR,ATRIB[14]}};
:
: Equivalence ltrib
EQUIVALENCE,{{NOPROD,LTRIB[0]}, {OP1,LTRIB[1]}, {OP2,LTRIB[2]}, {OP3,LTRIB[3]}, {OP4,LTRIB[4]}, {OP5,LTRIB[5]},
{OP6,LTRIB[6]}, {OP7,LTRIB[7]}, {OP8,LTRIB[8]}, {OP,LTRIB[9]}, {XP,LTRIB[11]}, {BLOCAGE,LTRIB[12]}};
:
=====
:
: Création des vecteurs pour la flexibilité de routage relative aux opérations des pièces
:
ARRAY,1001,16;
ARRAY,1101,16;
ARRAY,1002,16;
ARRAY,1102,16;
ARRAY,1003,16;
ARRAY,1103,16;
ARRAY,1004,16;
ARRAY,1104,16;
ARRAY,1005,16;
ARRAY,1105,16;
ARRAY,1006,16;
ARRAY,1106,16;
ARRAY,1007,16;
ARRAY,1107,16;
ARRAY,1008,16;
ARRAY,1108,16;
ARRAY,1009,16;
ARRAY,1109,16;
ARRAY,1010,16;
ARRAY,1110,16;
ARRAY,1011,16;
ARRAY,1111,16;
ARRAY,1012,16;
ARRAY,1112,16;
ARRAY,1013,16;
ARRAY,1113,16;
ARRAY,1014,16;
ARRAY,1114,16;
ARRAY,1015,16;
ARRAY,1115,16;
ARRAY,1016,16;
ARRAY,1116,16;
ARRAY,1017,16;
ARRAY,1117,16;
ARRAY,1018,16;
ARRAY,1118,16;
ARRAY,1019,16;
ARRAY,1119,16;
ARRAY,1020,16;
```



```

ARRAY,1120,16;
ARRAY,1021,16;
ARRAY,1121,16;
ARRAY,1022,16;
ARRAY,1122,16;
ARRAY,1023,16;
ARRAY,1123,16;
ARRAY,1024,16;
ARRAY,1124,16;
ARRAY,1025,16;
ARRAY,1125,16;
ARRAY,1026,16;
ARRAY,1126,16;
ARRAY,1027,16;
ARRAY,1127,16;
ARRAY,1028,16;
ARRAY,1128,16;
ARRAY,1029,16;
ARRAY,1129,16;
ARRAY,1030,16;
ARRAY,1130,16;
;
; Création des vecteurs pour satisfaire les logiques de routine
ARRAY,99,5;
;
; Création des vecteurs comportant des infos sur les machines:
ARRAY,101,5;
ARRAY,102,5;
ARRAY,103,5;
ARRAY,104,5;
ARRAY,105,5;
ARRAY,106,5;
ARRAY,107,5;
ARRAY,108,5;
ARRAY,109,5;
ARRAY,110,5;
ARRAY,201,5;
ARRAY,202,5;
ARRAY,203,5;
ARRAY,204,5;
ARRAY,205,5;
ARRAY,206,5;
ARRAY,207,5;
ARRAY,208,5;
ARRAY,209,5;
ARRAY,210,5;
ARRAY,301,5;
ARRAY,302,5;
ARRAY,303,5;
ARRAY,304,5;
ARRAY,305,5;
ARRAY,306,5;
ARRAY,307,5;
ARRAY,308,5;
ARRAY,309,5;
ARRAY,310,5;
ARRAY,401,5;
ARRAY,402,5;
ARRAY,403,5;
ARRAY,404,5;
ARRAY,405,5;
ARRAY,406,5;
ARRAY,407,5;
ARRAY,408,5;
ARRAY,409,5;
ARRAY,410,5;

```

ARRAY.501.5;
 ARRAY.502.5;
 ARRAY.503.5;
 ARRAY.504.5;
 ARRAY.505.5;
 ARRAY.506.5;
 ARRAY.507.5;
 ARRAY.508.5;
 ARRAY.509.5;
 ARRAY.510.5;
 ARRAY.601.5;
 ARRAY.602.5;
 ARRAY.603.5;
 ARRAY.604.5;
 ARRAY.605.5;
 ARRAY.606.5;
 ARRAY.607.5;
 ARRAY.608.5;
 ARRAY.609.5;
 ARRAY.610.5;

;
 =====

. Vecteurs des distances entre les cellules:

ARRAY.100.6;
 ARRAY.200.6;
 ARRAY.300.6;
 ARRAY.400.6;
 ARRAY.500.6;
 ARRAY.600.6;
 ARRAY.700.6;

;
 =====

TIMST.1.RRMAX(88)*RRAVG(88),"SC1A: Equip. manutention".0,0,0,1,0;
 TIMST.2.RRMAX(88),"SC1A: Equip. manu. si =0; MAX ".0,0,0,1,0;
 TIMST.3.GRPMAX(1)-GRPMAX(2)-GRPMAX(3)-GRPMAX(4)-GRPMAX(5),"SC1C: Equip. stockage".0,0,0,1,0;
 TIMST.4.XX[0],"SC2A: WIP".0,0,0,1,0;
 TIMST.5.(CCAVG(15)-CCAVG(1)-CCAVG(2)-CCAVG(3)-CCAVG(4)-CCAVG(5)-CCAVG(6)-CCAVG(7)-CCAVG(8)-CCAVG(9)-CCAVG(10)-CCAVG(11)-CCAVG(12)-CCAVG(13)-CCAVG(14))/15,"SC2B: TEMPS SYST A".0,0,0,1,0;
 TIMST.6.(CCAVG(115)-CCAVG(101)-CCAVG(102)-CCAVG(103)-CCAVG(104)-CCAVG(105)-CCAVG(106)-CCAVG(107)-CCAVG(108)-CCAVG(109)-CCAVG(110)-CCAVG(111)-CCAVG(112)-CCAVG(113)-CCAVG(114))/15,"SC2C: CADENCE".0,0,0,1,0;
 TIMST.7.(AAAVG(12)-AAAVG(13)-AAAVG(21)-AAAVG(22)-AAAVG(23))*240000,"SC3A: T.Transports ".0,0,0,1,0;
 TIMST.8.NNCNT(35)/(NNCNT(20)-1),"SC3B: TAUX REJET ".0,0,0,1,0;
 TIMST.9.VSNEXPR("SCEL1X","101".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","102".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","103".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","104".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","105".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","106".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","107".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","108".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","109".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL1X","110".TTMAX(101))-VSNEXPR("SCEL2X","201".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","202".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","203".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","204".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","205".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","206".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","207".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","208".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","209".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL2X","210".TTMAX(201))-VSNEXPR("SCEL3X","301".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","302".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","303".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","304".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","305".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","306".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","307".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","308".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","309".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL3X","310".TTMAX(301))-VSNEXPR("SCEL4X","401".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","402".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","403".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","404".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","405".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","406".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","407".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","408".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","409".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL4X","410".TTMAX(401))-VSNEXPR("SCEL5X","501".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","502".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","503".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","504".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","505".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","506".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","507".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","508".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","509".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL5X","510".TTMAX(501))-VSNEXPR("SCEL6X","601".TTMAX(601))-VSNEXPR("SCEL6X","602".TTMAX(601))-VSNEXPR("SCEL6X","603".TTMAX(601))-VSNEXPR("SCEL6X","604".TTMAX(601))-VSNEXPR("SCEL6X","605".TTMAX(601))-VSNEXPR("SCEL6X","606".TTMAX(601))-VSNEXPR("S

```

CEL6X","607",TTMAX(601))-VSNEXP("SCEL6X","608",TTMAX(601))-VSNEXP("SCEL6X","609",TTMAX(601))-VSNE
XP("SCEL6X","610",TTMAX(601)),SC3C: TEMP.Pann",0,0,0,1,0;
TIMST,10,VSNEXP("SCEL1X","101",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc101",0,0,0,1,0;
TIMST,11,VSNEXP("SCEL1X","102",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc102",0,0,0,1,0;
TIMST,12,VSNEXP("SCEL1X","103",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc103",0,0,0,1,0;
TIMST,13,VSNEXP("SCEL1X","104",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc104",0,0,0,1,0;
TIMST,14,VSNEXP("SCEL1X","105",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc105",0,0,0,1,0;
TIMST,15,VSNEXP("SCEL1X","106",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc106",0,0,0,1,0;
TIMST,16,VSNEXP("SCEL1X","107",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc107",0,0,0,1,0;
TIMST,17,VSNEXP("SCEL1X","108",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc108",0,0,0,1,0;
TIMST,18,VSNEXP("SCEL1X","109",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc109",0,0,0,1,0;
TIMST,19,VSNEXP("SCEL1X","110",RRAVG(10)),SC2D: T. Proc110",0,0,0,1,0;
TIMST,20,VSNEXP("SCEL2X","201",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc201",0,0,0,1,0;
TIMST,21,VSNEXP("SCEL2X","202",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc202",0,0,0,1,0;
TIMST,22,VSNEXP("SCEL2X","203",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc203",0,0,0,1,0;
TIMST,23,VSNEXP("SCEL2X","204",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc204",0,0,0,1,0;
TIMST,24,VSNEXP("SCEL2X","205",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc205",0,0,0,1,0;
TIMST,25,VSNEXP("SCEL2X","206",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc206",0,0,0,1,0;
TIMST,26,VSNEXP("SCEL2X","207",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc207",0,0,0,1,0;
TIMST,27,VSNEXP("SCEL2X","208",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc208",0,0,0,1,0;
TIMST,28,VSNEXP("SCEL2X","209",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc209",0,0,0,1,0;
TIMST,29,VSNEXP("SCEL2X","210",RRAVG(20)),SC2D: T. Proc210",0,0,0,1,0;
TIMST,30,VSNEXP("SCEL3X","301",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc301",0,0,0,1,0;
TIMST,31,VSNEXP("SCEL3X","302",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc302",0,0,0,1,0;
TIMST,32,VSNEXP("SCEL3X","303",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc303",0,0,0,1,0;
TIMST,33,VSNEXP("SCEL3X","304",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc304",0,0,0,1,0;
TIMST,34,VSNEXP("SCEL3X","305",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc305",0,0,0,1,0;
TIMST,35,VSNEXP("SCEL3X","306",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc306",0,0,0,1,0;
TIMST,36,VSNEXP("SCEL3X","307",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc307",0,0,0,1,0;
TIMST,37,VSNEXP("SCEL3X","308",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc308",0,0,0,1,0;
TIMST,38,VSNEXP("SCEL3X","309",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc309",0,0,0,1,0;
TIMST,39,VSNEXP("SCEL3X","310",RRAVG(30)),SC2D: T. Proc310",0,0,0,1,0;
TIMST,40,VSNEXP("SCEL4X","401",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc401",0,0,0,1,0;
TIMST,41,VSNEXP("SCEL4X","402",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc402",0,0,0,1,0;
TIMST,42,VSNEXP("SCEL4X","403",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc403",0,0,0,1,0;
TIMST,43,VSNEXP("SCEL4X","404",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc404",0,0,0,1,0;
TIMST,44,VSNEXP("SCEL4X","405",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc405",0,0,0,1,0;
TIMST,45,VSNEXP("SCEL4X","406",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc406",0,0,0,1,0;
TIMST,46,VSNEXP("SCEL4X","407",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc407",0,0,0,1,0;
TIMST,47,VSNEXP("SCEL4X","408",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc408",0,0,0,1,0;
TIMST,48,VSNEXP("SCEL4X","409",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc409",0,0,0,1,0;
TIMST,49,VSNEXP("SCEL4X","410",RRAVG(40)),SC2D: T. Proc410",0,0,0,1,0;
TIMST,50,VSNEXP("SCEL5X","501",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc501",0,0,0,1,0;
TIMST,51,VSNEXP("SCEL5X","502",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc502",0,0,0,1,0;
TIMST,52,VSNEXP("SCEL5X","503",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc503",0,0,0,1,0;
TIMST,53,VSNEXP("SCEL5X","504",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc504",0,0,0,1,0;
TIMST,54,VSNEXP("SCEL5X","505",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc505",0,0,0,1,0;
TIMST,55,VSNEXP("SCEL5X","506",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc506",0,0,0,1,0;
TIMST,56,VSNEXP("SCEL5X","507",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc507",0,0,0,1,0;
TIMST,57,VSNEXP("SCEL5X","508",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc508",0,0,0,1,0;
TIMST,58,VSNEXP("SCEL5X","509",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc509",0,0,0,1,0;
TIMST,59,VSNEXP("SCEL5X","510",RRAVG(50)),SC2D: T. Proc510",0,0,0,1,0;
TIMST,60,VSNEXP("SCEL6X","601",RRAVG(60)),SC2D: T. Proc601",0,0,0,1,0;
TIMST,61,VSNEXP("SCEL6X","602",RRAVG(60)),SC2D: T. Proc602",0,0,0,1,0;
TIMST,62,VSNEXP("SCEL6X","603",RRAVG(60)),SC2D: T. Proc603",0,0,0,1,0;
TIMST,63,VSNEXP("SCEL6X","604",RRAVG(60)),SC2D: T. Proc604",0,0,0,1,0;
TIMST,64,VSNEXP("SCEL6X","605",RRAVG(60)),SC2D: T. Proc605",0,0,0,1,0;
:
:
:
Durée de la simulation == 1 an = 240 000 minutes (244800-4800)
INITIALIZE,0,0,244800,YES,,NO;
NETWORK,READ;
FIN; //

```

Exemple d'un fichier des sous-routines en C++ (politique type A):

```
#include "vslam.h"
void SWFUNC EVENT(int iCode, ENTITY * peCurEnt)

/***** CODFLEXA.C *****/
**
** Cette routine permet d'exploiter la flexibilité de routage selon les règles suivantes
**
** A) Prends la machine dont l'espace tampon est le plus grand.
**
** B) Si égalité, prends la machine offrant le temps de production le plus faible
**
*****/

{
int Alter1,Alter2,OP,index,cap1,cap2,tprod1,tprod2; /*** variables pour cas 1 ***/
int Alt1,Alt2,OPB,indx,capa1,capa2,tpro1,tpro2; /*** variables pour cas 2 ***/
int mach,intermach,ACELL,AP,IP; /*** variables pour cas 3 ***/

switch (iCode)
{
case 1: /* Arrivée de l'entité au noeud ROUTINE1 */

OP = peCurEnt->LTRIB[9]; /*Pointe sur # de séquence*/
OP = OP+1; /*Incremente pour pointer sur la prochaine
ope*/
index = peCurEnt->ETYPE; /*Prend le no. du produit en mém. */
Alter1 = GETARY((index+1000),OP); /*Machine alternative1 pour la présente
opération*/
Alter2 = GETARY((index+1100),OP); /*Machine alternative2 pour la présente
opération*/
cap1 = NNRSC(Alter1); /*Capacité instantannée de la ressource
alternative 1*/
cap2 = NNRSC(Alter2); /*Capacité instantannée de la ressource
alternative 2*/
tprod1=GETARY((index+1000),(OP+8)); /*Temps de production de l'altern. 1*/
tprod2=GETARY((index+1100),(OP+8)); /*Temps de production de l'altern. 2*/

if (Alter1 > 100 && Alter2 > 100 && (cap1>0 && cap2 >0))
{
if (tprod2 > tprod1) /*Si alt1 est mieux que 2*/
{
peCurEnt->LTRIB[OP]=Alter1; /*Assigne l'opération à une autre
machine*/
peCurEnt->ATRIB[OP]=tprod1; /*Changes le temps de production
dans la variable locale*/
peCurEnt->LTRIB[12]=1; /*L'envoi au réseau princ.*/
SEIZE(Alter1,1); /*Prend une ress. tampon 1*/
break;
}
}
}
```

```

else if (tprod2 == tprod1)          /*si les temps sont égaux, on prend
le tampon le moins plein*/
{
    if (cap2 > cap1) /*Plus d'espace ds tamp1 que tamp2*/
    {
        peCurEnt->LTRIB[OP]=Alter2; /*Assigne l'opération à une
autre machine*/
        peCurEnt->ATRIB[OP]=tprod2; /*Changes le temps de
production dans la variable locale*/
        peCurEnt->LTRIB[12]=1;      /*L'envoi dans le réseau
principale*/
        SEIZE(Alter2,1);           /*Prend une ressource tampon 2*/
        break;
    }
    else
    {
        peCurEnt->LTRIB[OP]=Alter1; /*Assigne l'opération à une
autre machine*/
        peCurEnt->ATRIB[OP]=tprod1; /*Changes le temps de
production dans la variable locale*/
        peCurEnt->LTRIB[12]=1;      /*L'envoi dans le réseau
principale*/
        SEIZE(Alter1,1);           /*Prend une ressource tampon 1*/
        break;
    }
}
else
{
    peCurEnt->LTRIB[OP]=Alter2; /*Assigne l'opération à autre
machine*/
    peCurEnt->ATRIB[OP]=tprod2; /*Changes le temps de production
dans la variable locale*/
    peCurEnt->LTRIB[12]=1;          /*L'envoi au réseau princ.*/
    SEIZE(Alter2,1);                /*Prend ressource tampon 2*/
    break;
}
}

else if (Alter1 > 100 && cap1 > 0)
{
    peCurEnt->LTRIB[OP]=Alter1; /*Assigne l'opération à une autre
machine*/
    peCurEnt->ATRIB[OP]=tprod1; /*Changes le temps de production dans la
variable locale*/
    peCurEnt->LTRIB[12]=1;          /*L'envoi dans le réseau princ.*/
    SEIZE(Alter1,1);                /*Prend une ressource tampon1 */
    break;
}

else if (Alter2 > 100 && cap2 > 0)
{
    peCurEnt->LTRIB[OP]=Alter2; /*Assigne l'opération autre mach*/
    peCurEnt->ATRIB[OP]=tprod2; /*Changes le temps de production dans la
variable locale*/
    peCurEnt->LTRIB[12]=1;          /*L'envoi dans le réseau princ.*/
    SEIZE(Alter2,1);                /*Prend une ressource tampon2 */
    break;
}
}
else

```

```

{
    peCurEnt->LTRIB[12]=0;          /*n'envoie pas dans réseau princ.*/
}
break;

/** FIN CASE 1**/

case 2:          /* Arrivée de l'entité au noeud Bouchon2 */

    OPE = peCurEnt->LTRIB[9];          /*Pointe sur # de séquence*/
    indx = peCurEnt->ETYPE;             /*Prend en mémoire le no. produit*/
    Alt1 = GETARY((indx+1000),OPE);      /*Machine alternative 1*/
    capa1 = NNRSC(Alt1);                 /*Capacité instantannée de la ressource
alternative 1*/
    Alt2 = GETARY((indx+1100),OPE);      /*Machine alternative 2*/
    capa2 = NNRSC(Alt2);                 /*Capacité instantannée de la ressource
alternative 2*/
    tpro1 = GETARY((indx+1000),(OPE+8)); /*Temps de production de altern. 1*/
    tpro2 = GETARY((indx+1100),(OPE+8)); /*Temps de production de altern. 2*/

    if (Alt1 > 100 && Alt2 > 100 && (capa1>0 && capa2 >0))
    {
        if (tpro2 > tpro1)                /*Si alt1 est mieux que 2*/
        {
            peCurEnt->LTRIB[OPE]=Alt1;    /*Assigne l'opération à une autre
machine*/
            peCurEnt->ATRIB[OPE]=tpro1;    /*Changes le temps de production
dans la variable locale*/
            break;
        }
        else if (tprod2 == tprod1)
        {
            if (capa2 > capa1)
            {
                peCurEnt->LTRIB[OPE]=Alt2;    /*Assigne l'opération à une
autre machine*/
                peCurEnt->ATRIB[OPE]=tpro2;    /*Changes le temps de
production dans la variable locale*/
                break;
            }
            else
            {
                peCurEnt->LTRIB[OPE]=Alt1;    /*Assigne l'opération à une
autre machine*/
                peCurEnt->ATRIB[OPE]=tpro1;    /*Changes le temps de
production dans la variable locale*/
                break;
            }
        }
        else
        {
            peCurEnt->LTRIB[OPE]=Alt2;    /*Assigne opér à autre mach*/
            peCurEnt->ATRIB[OPE]=tpro2;    /*Changes le temps de production
dans la variable locale*/
            break;
        }
    }

```

```

    }
  }
  else if (Alt1 > 100 && capa1 > 0)
  {
    peCurEnt->LTRIB[OPE]=Alt1; /*Assigne l'opér. à autre machine*/
    peCurEnt->ATRIB[OPE]=tpro1; /*Changes le temps de production dans la
variable locale*/
    break;
  }
  else if (Alt2 > 100 && capa2 > 0)
  {
    peCurEnt->LTRIB[OPE]=Alt2; /*Assigne l'opér. à autre machine*/
    peCurEnt->ATRIB[OPE]=tpro2; /*Changes le temps de production dans la
variable locale*/
    break;
  }
  else
  {
  }
  break;

/** FIN CASE 2**/

/** routine du flux intercellulaire *****/

case 3: /* Arrivée d'un entité au noeud TEMPTRANSPORT_DE_CELL_ #1, 2, 3,
4, ou 5 **/

  IP = peCurEnt->LTRIB[9]; /*Pointe sur # de sequence*/
  AP = IP-1;
  mach = peCurEnt->LTRIB[AP]; /* Quelle la dernière operation*/
  intermach = peCurEnt->LTRIB[IP]; /* Quelle la prochaine operation, soit la
prochaine cellule*/

  if (mach>100 && mach<199) /****** DE CELLULE #1 *****/
  {
    ACELL = 100; /* indice */

    if (intermach>200 && intermach<299) /**** Début de sous routine pour
pointer sur le bon temps de transport***/
    {
      peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,2);
    }
    else if (intermach>300 && intermach<399)
    {
      peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,3);
    }
    else if (intermach>400 && intermach<499)
    {
      peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,4);
    }
    else if (intermach>500 && intermach<599)
    {
      peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,5);
    }
    else if (intermach>600 && intermach<699)
    {
      peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,6);
    }
  }

```

```

else
{
    peCurEnt->ATRIB[11] = 0;
}

else if (mach>200 && mach<299)          /***** DE CELLULE # 2*****/
{
    ACELL = 200;                          /* indice */

    if (intermach>100 && intermach<199) /*** Début de sous routine pour
pointer sur le bon temps de transport***/
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,1);
    }
    else if (intermach>300 && intermach<399)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,3);
    }
    else if (intermach>400 && intermach<499)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,4);
    }
    else if (intermach>500 && intermach<599)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,5);
    }
    else if (intermach>600 && intermach<699)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,6);
    }
    else
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = 0;
    }
}

else if (mach>300 && mach<399)          /***** DE CELLULE # 3*****/
{
    ACELL = 300;                          /* indice */

    if (intermach>100 && intermach<199) /*** Début de sous routine pour
pointer sur le bon temps de transport***/
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,1);
    }
    else if (intermach>200 && intermach<299)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,2);
    }
    else if (intermach>400 && intermach<499)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,4);
    }
    else if (intermach>500 && intermach<599)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,5);
    }
    else if (intermach>600 && intermach<699)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = GETARY(ACELL,6);
    }
    else
    {
        peCurEnt->ATRIB[11] = 0;
    }
}

```



```

    }
}

else if (mach>400 && mach<499)          /***** DE CELLULE # 4*****/
{
    ACELL = 400;                          /* indice */

    if (intermach>100 && intermach<199) /*** Début de sous routine pour
pointer sur le bon temps de transport***/
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,1);
    }
    else if (intermach>200 && intermach<299)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,2);
    }
    else if (intermach>300 && intermach<399)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,3);
    }
    else if (intermach>500 && intermach<599)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,5);
    }
    else if (intermach>600 && intermach<699)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,6);
    }
    else
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= 0;
    }
}

else if (mach>500 && mach<599)          /***** DE CELLULE # 5*****/
{
    ACELL = 500;                          /* indice */

    if (intermach>100 && intermach<199) /*** Début de sous routine pour
pointer sur le bon temps de transport***/
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,1);
    }
    else if (intermach>200 && intermach<299)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,2);
    }
    else if (intermach>300 && intermach<399)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,3);
    }
    else if (intermach>400 && intermach<499)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,4);
    }
    else if (intermach>600 && intermach<699)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,6);
    }
    else
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= 0;
    }
}
}

```

```

else if (mach>600 && mach<699)          /***** DE CELLULE # 6*****/
{
    ACELL = 600;                        /* indice */

    if (intermach>100 && intermach<199) /*** Début de sous routine pour
pointer le bon temps de transport***/
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,1);
    }
    else if (intermach>200 && intermach<299)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,2);
    }
    else if (intermach>300 && intermach<399)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,3);
    }
    else if (intermach>400 && intermach<499)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,4);
    }
    else if (intermach>500 && intermach<599)
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= GETARY(ACELL,5);
    }
    else
    {
        peCurEnt->ATRIB[11]= 0;
    }
}

/** FIN CASE 3**/

break;

default:
    su_error(1,"Unknown event code");
break;
}
}

```

ANNEXE 2

Description du modèle générale de simulation de SMC, phase II

Description des variables du modèle de simulation

Pour bien définir les données qui circulent dans le modèle, on définit d'abord les variables, de type local ou global, et les objets principaux modélisés avec *Visual Slam*.

Les types de produits : Les produits seront codés numériquement et passés au réseau par le biais de la variable ETYPE dédiée, dans *Visual Slam*, à nommer numériquement une entité.

Exemple : Nom de la pièce : P001
 ETYPE = 1

La demande : La demande sera de type déterministe ou stochastique tel que décrit au chapitre 2. Elle est définie sous une variable réelle de type locale, ATRIB [10], et suivra l'entité dans le système. Elle est propre au type de pièce, voire propre à l'entité. Sa valeur est présentée sous forme d'un taux hebdomadaire et sera transformée à l'aide de l'équation du TIA pour le temps inter-arrivée. La génération des arrivées des produits sera assurée par un nœud ASSIGN et d'une boucle qui clonera au rythme du TIA (variable ATRIB [9]) les produits.

Les cellules de production: Les cellules sont représentées par un sous-réseau identifié à son nom. Un maximum de cinq cellules peut être pris en charge par le modèle. La fonction utilisée pour appeler la cellule est le nœud CALLVSN qui servira aussi de lien avec le sous-réseau. Tout comme le réseau principal, chaque sous-réseau sera un fichier indépendant mais greffé au principal.

Les familles de produit: Les familles de produits sont représentées implicitement par les produits dont la majorité de leurs opérations sont complétées dans la même cellule. À titre de rappel, le fichier de résultats de l'heuristique de la phase I classe les séquences d'opération par famille de produits.

Les types de machines: La représentation des machines fait appel à la notion d'instance des sous-réseaux. Grâce à cette notion inspirée de la programmation orientée objet, nous pouvons utiliser le même objet (sous-réseau) pour chaque type de machine d'une même cellule en utilisant cette dernière sous le nom de la machine (l'instance). Les machines ou les processeurs seront modélisés sous forme d'une ressource avec la fonction BLOCK RESOURCE dans le sous-réseau où sa capacité est fixée à l'aide d'une variable globale qui lui est passée en paramètre. Cette variable prend sa valeur dans l'un des vecteurs relatifs à chaque type de machine. Chaque type de machine possède donc son vecteur, variable vecteur ARRAY, possédant un nombre limité de données relatives au type de machine. L'index numérique du vecteur, soit le numéro de la ligne, porte le même numéro que la machine. Ainsi, on utilisera la variable du numéro de machine pour pointer sur le bon vecteur de données. Les machines ont la nomenclature suivante:

Exemple: 201 == Machine de type M001 dans la cellule #2

Les tampons: Ils seront modélisés comme des ressources dans le réseau principal. Pour préciser, chaque type de machine à l'intérieure d'une cellule aura sa ressource tampon peu importe sa capacité (nombre de machines). Ainsi, il y aura une seule file d'attente par type de processeur à l'intérieur de chaque cellule.

Les équipements de manutention: Un seul type d'équipement de manutention est prévu dans le modèle. Notre secteur manufacturier étant le domaine de l'usinage, il est plus plausible pour l'évaluation d'un tel système de s'en tenir à modéliser un seul type d'équipement de manutention qui circule entre les cellules. Nous nommerons cet équipement CHARIOT. Il sera modélisé dans le réseau principal de capacité réglable selon le scénario. À noter que les temps de transport, détenus dans la base de données, seront représentés par une variable locale et sa valeur dépendra de l'éloignement des cellules, l'une par rapport à l'autre.

Les séquences d'opérations: Chaque opération est identifiée par le nom de la machine dans le plan de production. Une possibilité de huit (8) opérations peuvent être inscrites à la base de données et suivent l'entité sous forme de variables locales. Par exemple, dans le cas où la pièce n'a que quatre (4) opérations de production, les autres variables des opérations (#5 à #8) prendront la valeur «99» pour des fins de logique.

Les temps de production: Comme pour la séquence d'opérations, les huit temps d'opération sont inscrits à la base de données et prendront la valeur nulle s'il n'y a pas d'opération pour sa séquence respective. Ce temps inclut le temps de mise en route et sera contenu dans une variable réelle de type local, ATRIB [i] (i pour le numéro de séquence).

Les alternatives de routage: Pour ajouter de la flexibilité au modèle, deux possibilités de routage par opération peuvent être inscrites dans une base de données déclarée à cette fin. Pour chaque produit, deux vecteurs (2 possibilités de routage) de 16 données comprennent les informations relatives à l'alternative de routage (numéro de la machine) pour une opération donnée et son nouveau temps de production.

Pour faciliter l'interprétation et le transfert des informations au modèle, le tableau suivant énumère d'une façon plus exhaustive toutes les variables avec leur équivalence en caractères (le nom). Il spécifie aussi s'il s'agit d'une variable locale ou d'une variable globale.

Tableau A.1

Liste des variables et leur équivalence

Description de la variable	Nom de la variable	Variable logique
Temps de production, opération #1	TEMPOP1	ATRIB[1]
Temps de production, opération #2	TEMPOP2	ATRIB[2]
Temps de production, opération #3	TEMPOP3	ATRIB[3]
Temps de production, opération #4	TEMPOP4	ATRIB[4]
Temps de production, opération #5	TEMPOP5	ATRIB[5]
Temps de production, opération #6	TEMPOP6	ATRIB[6]
Temps de production, opération #7	TEMPOP7	ATRIB[7]
Temps de production, opération #8	TEMPOP8	ATRIB[8]
Temps inter-arrivé des entités au système	TIA	ATRIB[9]
Demande hebdomadaire des produits	DEMPROD	ATRIB[10]
Temps de transport intercellulaire	TEMPTRANS	ATRIB[11]
Numéro du type de produit	ETYPE	ETYPE
Numéro unique d'un produit	NOPROD	LTRIB[0]
Opération 1 (nom de la machine assignée)	OP1	LTRIB[1]
Opération 2 (nom de la machine assignée)	OP2	LTRIB[2]
Opération 3 (nom de la machine assignée)	OP3	LTRIB[3]
Opération 4 (nom de la machine assignée)	OP4	LTRIB[4]
Opération 5 (nom de la machine assignée)	OP5	LTRIB[5]
Opération 6 (nom de la machine assignée)	OP6	LTRIB[6]
Opération 7 (nom de la machine assignée)	OP7	LTRIB[7]
Opération 8 (nom de la machine assignée)	OP8	LTRIB[8]
Index de # de séquence de production	OP	LTRIB[9]
Index de # de séquence de production suivant	XP	LTRIB[11]
Indice pour spécifier changement de routage	BLOCAGE	LTRIB[12]
Nom du type de produit	TYPEPROD	STRIB[0]

Les vecteurs :

Les vecteurs qui composent la base de données du simulateur sont aussi considérés comme des variables mais, d'un troisième genre de type global. Ce vecteur sous *Visual Slam* est déclaré sous la forme suivante:

Déclaration d'un vecteur : **ARRAY [# de ligne, nombre de données]**

Structure du vecteur machine:

machine; [capacité machine, capacité tampon, alternative 1, alternative 2]

Où les alternatives 1 et 2 signifient les machines équivalentes.

Structure du vecteur des temps de transport:

cellule; [temps 1, temps 2, temps 3, temps 4]

Variables locales:

Enfin, les attributs qui accompagnent en tout temps chaque entité (le produit ou la pièce) dans le système sont supportés par des variables locales. La figure A.1 définit bien la composition des variables qui suivent en tout temps chaque produit dans le système.

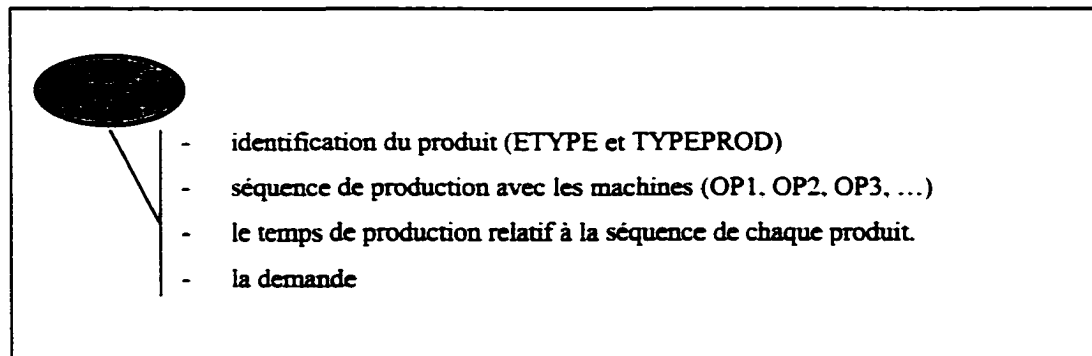


Figure A.1 Variables locales de l'entité dans le modèle de simulation

Il est à noter que ces variables peuvent être modifiées localement pour l'entité en question. Par exemple, s'il y a changement de machine du à un événement quelconque, OPi ou LTRIB [OP] pourra prendre une nouvelle valeur pour l'entité visée par le changement et ce, sans affecter d'autres entités ou ressources du système.

DESCRIPTION DU MODÈLE GÉNÉRAL

La présente section décrit les composantes du modèle général de simulation comprenant le réseau principal et ses sous-réseaux. L'usage des sous-réseaux sera fait pour représenter les cellules. Ils permettent un très haut niveau de flexibilité et permettra au concepteur de transformer sa configuration, s'il le veut, en système hybride. Ce changement pourra être rapidement sans modifier le réseau entier puisqu'une seule ressource est déclarée par sous-réseaux. On entendra par système hybride, le mélange de cellules manufacturières et d'atelier de machines identiques.

Le réseau principal :

Le modèle général d'un système manufacturier cellulaire est constitué d'un réseau principal et de cinq (5) liens sous-réseaux. Les sous-réseaux représentent chaque cellule portant le nom SCELL1 ou SCELL2 ou SCELL3, etc. L'instance de chaque sous-réseau portera le nom de la machine correspondant à l'opération OPi (LTRIB[OP]) en cours. Or, si cette opération est sous le contrôle d'une machine 301, cela signifiera donc que la cellule #3 sera appelée pour cette opération sous l'instance 301. Techniquement, le nom de la machine est obtenu par le nom de l'opération mais devra être transformé en caractère pour nommer l'instance. Pour ce cas, la variable STRIB[1] prendra ce nouveau caractère. Nous y reviendrons plus loin pour cette dernière opération.

Les ressources déclarées dans le réseau principal sont de trois types. Il y a les groupes de ressources tampons qui sont au nombre de cinq (5) qui permet de répertorier par cellule

Le dernier fichier à être lu par l'entité est le plan de production « planscX.dat » (Figure A.4). Le plan de production sera lu en clonant à l'aide d'une boucle d'activité l'entité au nombre d'individus qu'il y aura de produits (de lignes) dans le fichier. Les données lues sont ETYPE, TYPEPROD, DEMPROD, OP1, OP2, ... , OP8, TEMPROD1, ..., TEMPPROD7 et TEMPPROD8. Une boucle assure ainsi les lectures de chaque ligne jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de données, d'où la condition avec la variable globale LL[0] > 0. Les entités quittant ce nœud passeront ensuite par un nœud GOON (FILTREDEM) qui vérifie si la demande est POSITIVE pour leur donner accès à la réception; dans le cas contraire, elles sont acheminées à un nœud TERMINATE qui les sort du réseau.

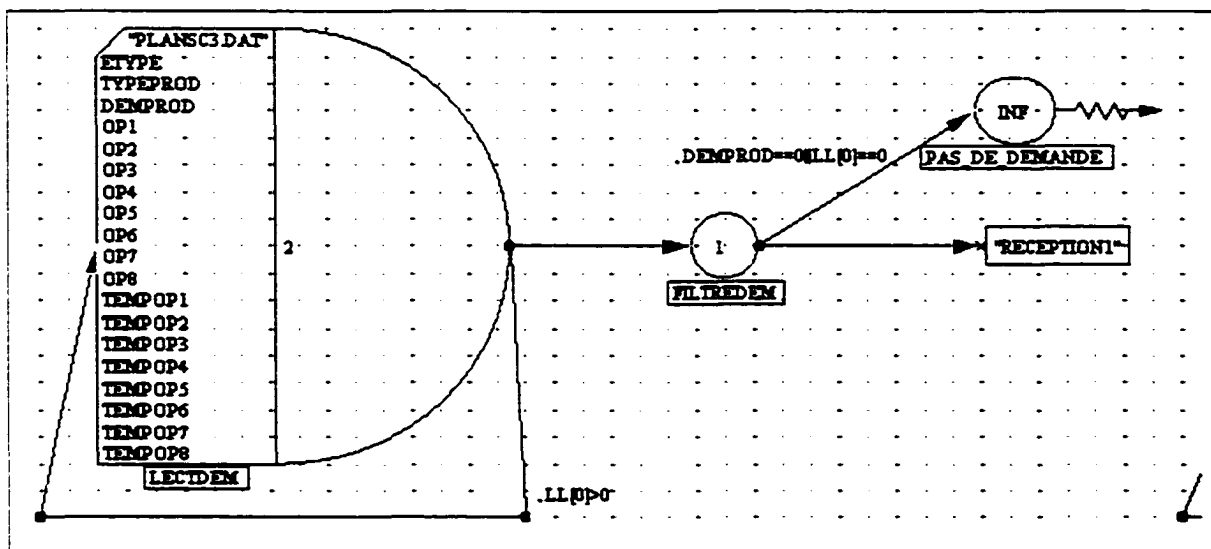


Figure A.4 Lecture des données du plan de production

Tel que montré à la figure A.5, le dernier fichier à être lu est la matrice des distances entre les cellules (DISTANCE.dat). Cette lecture est assurée par un petit réseau indépendant qui possède une boucle (activité) et des nœuds ASSIGN dont un incrément. L'entité provient du premier nœud CREATE vu plus haut.

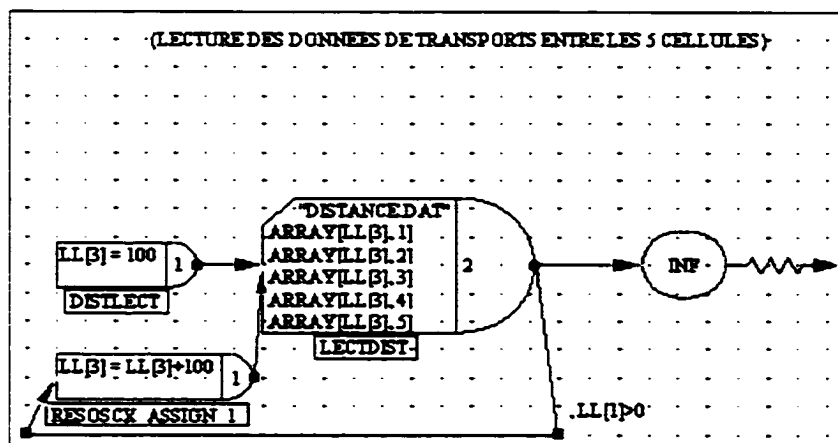


Figure A.5 Lecture des temps de transport

L'entité passe dans le premier nœud ASSIGN qui assigne la première valeur à LL[3] pour signifier la première cellule (100). Le processus de lecture est le même que le plan de production à l'exception de l'ajout d'un autre nœud qui augmente de 100 la variable globale pour signifier le vecteur respectif de la cellule (ARRAY[LL[3],1],...). Les entités clonées sont ensuite acheminées à un nœud final qui les sort du système. Le processus de lecture prend fin lorsqu'il n'y a plus de données à lire. La lecture des données relatives aux pannes (MTBF et MTTR de chaque machine) est aussi fait de la même façon (Figure A.6).

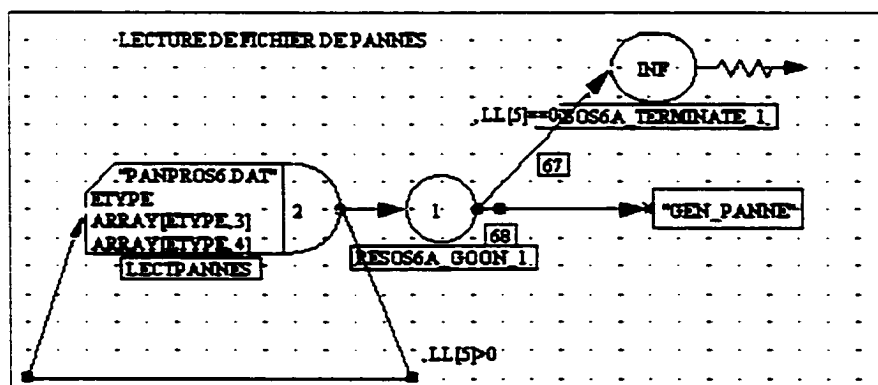


Figure A.6 Lecture des données de pannes

Enfin, la dernière étape de lecture de donnée consiste à la lecture des fichiers de données de la flexibilité de routage. Ces fichiers sont lus avec le processus en boucle déjà expliqué pour les autres lectures. Deux fichiers contiennent les deux séries de données qui seront enregistrées dans les vecteurs de la base de données. On remarque à la figure A.7 que l'indice ETYPE du numéro de produit sert à orienter les données dans les bons vecteurs. Ainsi, chaque ligne des fichiers débute par le numéro ETYPE qui servira par la suite à l'indice du vecteur ARRAY. Pour différencier les deux séries de vecteur, on ajoute les nombres 1000 et 1100 à ETYPE de part et d'autre.

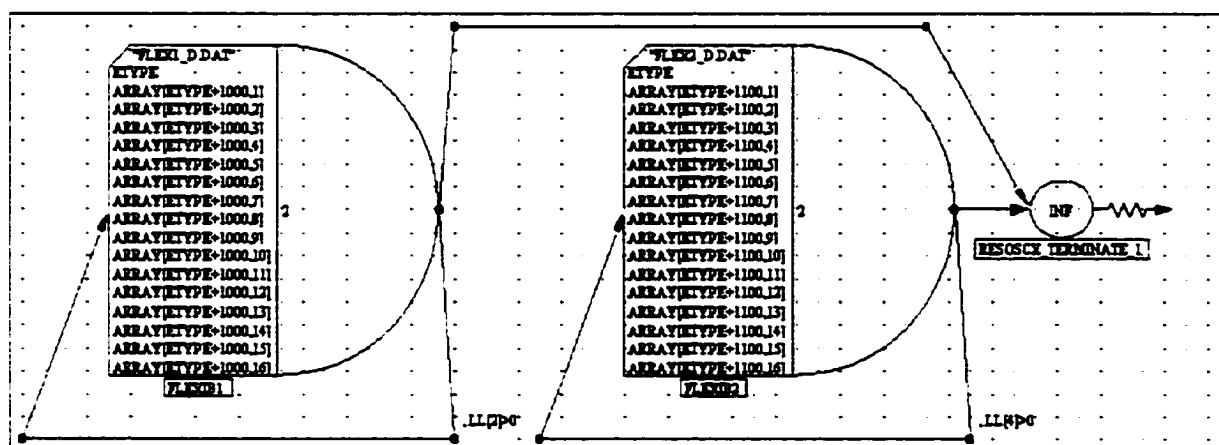


Figure A.7 Lecture des alternatives de routage

L'étape suivante du réseau correspond à la réception des commandes et des matières premières. Sur la figure A.8, l'entrée réelle des entités au système se fait par le biais d'un nœud ASSIGN et d'une boucle qui clone au rythme $RNORM(TIA, \alpha\% * TIA)$ l'entité « parent » de chaque produit. À noter que cette fonction de probabilité doit refléter les fluctuations relatives au marché visé par l'entreprise. Pour les besoins de notre cas d'application, nous avons choisi une loi normale de moyenne TIA et d'écart type de 10% du TIA. Le nœud ASSIGN permet le calcul du temps inter-arrivée TIA suivi de deux (2) sorties dont l'une pour la boucle et l'autre pour l'entrée au système. Ensuite, un nœud ASSIGN initialise cinq variables, soit le numéro de séquence d'opération OP, le temps d'entrée des individus dans la variable ATRIB [0] à l'aide de

la fonction TNOW, le numéro de production NOPROD, le temps de transport TEMPTRANS et le taux d'encours XX[0]. La variable TEMPTRANS y est mise à zéro étant donné l'omission du temps de transport pour la première machine. NOPROD servira de compteur pour les produits à l'aide de la fonction NNCNT(11). Avant de se diriger vers la file d'attente de la ressource de transport, l'activité #30 vérifie si la capacité du tampon relatif à la première opération est pleine. Si c'est le cas, un nœud EVENT appelle la sous-routine #2 qui choisit une alternative de routage pour cette opération. Dans le cas contraire, l'entité est conduite au nœud suivant. Un nœud GOON (GOON_1) est ensuite utilisé pour vérifier s'il y a bel et bien opération à faire ($LTRIB[OP] > 100$). Il sert aussi de lien de retour pour les transports intercellulaires qui arrive du nœud EVENT (TEMP_TRANSPORT). Ce dernier sert d'actionneur de la sous-routine #3 de fonction type EVENT programmé en langage C qui repère le bon temps de transport TEMPTRANS de l'ancienne cellule à la nouvelle cellule et ce, pour chaque entité qui passe par ce nœud.

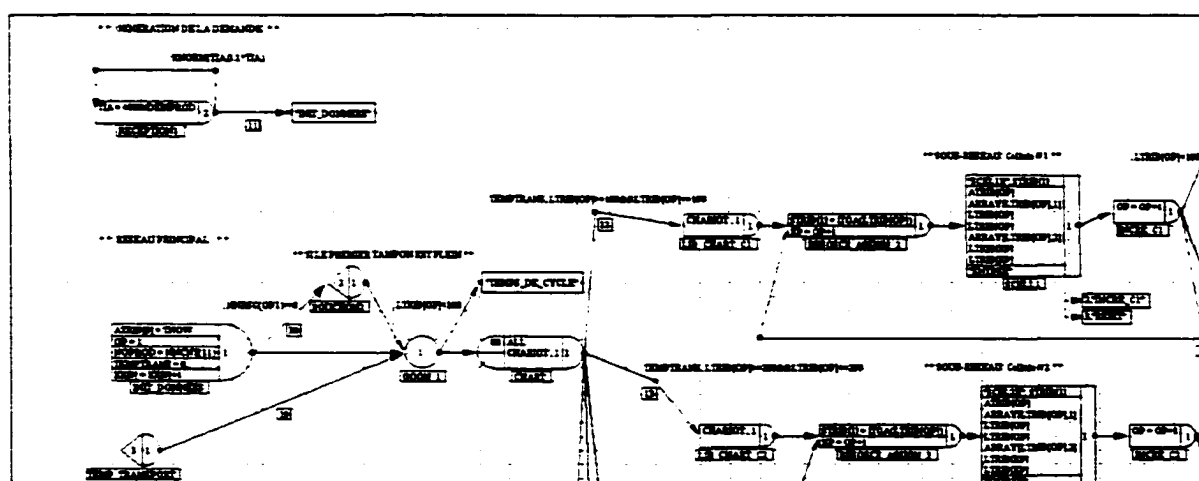


Figure A.8 Début du système de simulation du SMC

Une fois GOON_1 franchis, les entités à produire entrent dans une file d'attente pour réquisitionner une (1) ressource CHARIOT. Cette opération est modélisée par un nœud AWAIT (CHART) de capacité définie par le concepteur et d'une seule sortie. Cinq (5)

liens activités assurent ensuite la gestion de l'envoi des pièces aux bonnes cellules grâce à des conditions de reconnaissance imposées avec la variable LTRIB[OP] (voir figure A.8, activité 12). Le temps de l'activité de transport est pris en référence avec la variable TEMPTRANS.

La suite du réseau est composée de cinq fragments similaires du réseau qui représentent chaque cellule. Après chaque activité de transport, un nœud FREE est en place pour libérer le chariot assigné à la pièce qui arrive à la cellule. Avant d'appeler le sous-réseau, un nœud ASSIGN précède le nœud CALLVSN (CELLi) pour transformer le numéro de la machine en caractère (fonction ITOA) qui servira de nom d'instance et incrémente de 1 la variable XP. L'entrée dans la cellule se fait donc par le biais du nœud CALLVSN relié au sous-réseau (VSN) du même nom. Pour chaque nouvelle entité qui arrive à ce nœud, l'instance du VSN portera le nom de la machine requise pour l'opération de production. Sept (7) paramètres sont passés à la cellule. La première est le temps de production sous la variable ATRIB[OP]. La deuxième est la valeur de la capacité de la machine utilisée puisé dans son vecteur ARRAY[LTRIB[OP],1]. Les deux variables suivantes sont le numéro de la machine LTRIB[OP] passé deux fois pour les paramètres de numéro de file d'attente et de numéro de ressource tampon. La cinquième donnée passé en paramètre est le taux de rejet de la machine (ARRAY[LTRIB[OP],2]) et les deux dernières sont le numéro de la machine de la prochaine opération LTRIB[XP] passé en paramètres pour spécifier le prochain tampon. Trois sorties sont possibles pour chaque entité : soit elle reste dans la cellule par le biais d'une boucle activité (et d'un nœud ASSIGN qui incrémente de 1 la séquence d'opération), soit l'entité est envoyée à une autre cellule (sortie 2) ou encore, soit l'entité est rejetée par cause de non - conformité (sortie 3). Dans le cas d'un flux intercellulaire, l'entité est envoyée au nœud TEMP_TRANSPORT pour lui attribuer son temps de transport respectif. S'il y a rejet, l'entité est envoyée à un nœud WRITE (REJET) qui compile les données pour chaque mauvaise pièce. Et si l'entité emprunte la sortie régulière, il se pourra qu'elle soit à sa dernière opération où LTRIB[OP+1] = 1. Dans ce dernier cas, l'entité sera acheminée

aux nœuds COLLECT (TEMPS_DE_CYCLE) et COLLECT (CADENCE) pour fin de statistiques. Autrement, elle est envoyée au nœud TEMP_TRANSPORT. Les entités terminent toutes leur course dans un nœud TERMINATE (SORTIE) qui les détruit. Avant sa sortie du système, l'entité passe par un nœud ASSIGN qui met à jour les encours du système ($WIP \Rightarrow XX[0] = XX[0] - 1$).

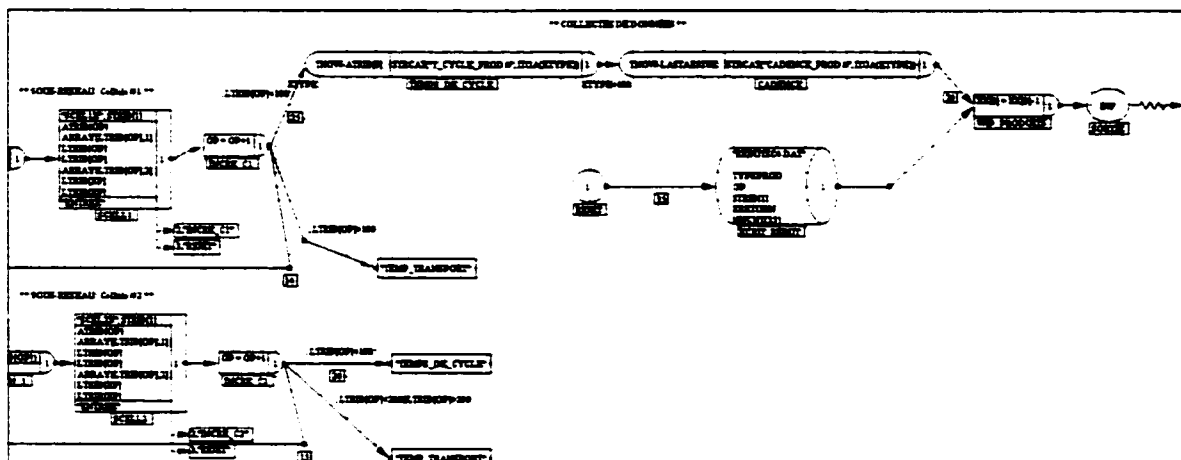


Figure A.9 Appels des sous-réseaux et fin du réseau

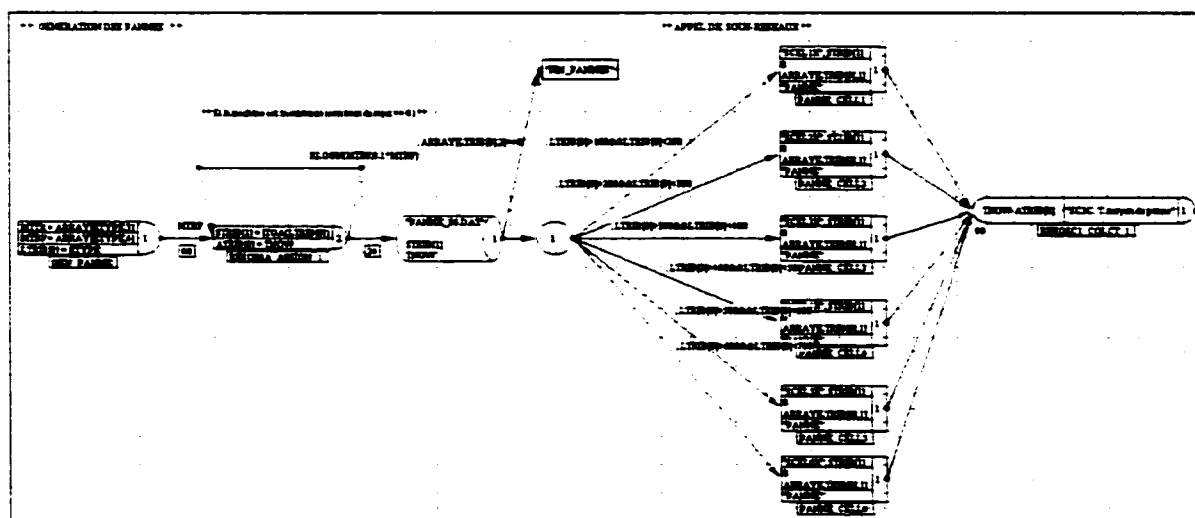


Figure A.10 Réseau de génération des pannes

Le réseau de génération des pannes possède la même structure que le réseau principal. Au lieu d'avoir des entités représentant des produits, le réseau fait entrer des entités qui

modéliseront les pannes. Ces entités entreront dans les sous-réseaux pour réquisitionner la première unité de machines en cours d'opération et ce, pour une durée égale au MTTR de la machine.

Les sous-réseaux :

Tous les sous-réseaux sont identiques mais se distinguent par leur nom seulement. Il possède les mêmes nœuds et activités et font appel aux mêmes bases de données et aux mêmes sous-routines. Tel que montré au coin supérieur gauche à la figure A.8, ce réseau comprend un bloc descriptif du VSN et un bloc ressource spécifiant le processeur. Le bloc descriptif déclare sept (7) variables qui recevront les paramètres décrits précédemment au nœud CALLVSN. La capacité de la ressource déclarée pour le type de machine reçoit sa valeur du 2^e paramètre du bloc. Le sous-réseau débute par un nœud ENTERVSN (ENTRÉE) qui mène les entités à la file TFILE pour prendre place dans le tampon. Cette file est modélisée par un nœud AWAIT qui réquisitionne une ressource tampon. S'il ne s'agit pas de la première opération de la séquence, l'entité est déviée pour être dirigée directement dans la file d'attente #10 du processeur. Un deuxième nœud AWAIT (RESMACH_i) suit pour recevoir les entités du tampon. Ce nœud réquisitionne une ressource MACH_i qui permet ensuite de libérer une ressource tampon avec un nœud FREE. L'activité 101 sur la figure A.10 représente la durée de l'opération avec la valeur TEMPOPE passée comme premier paramètre dans le bloc VSN.

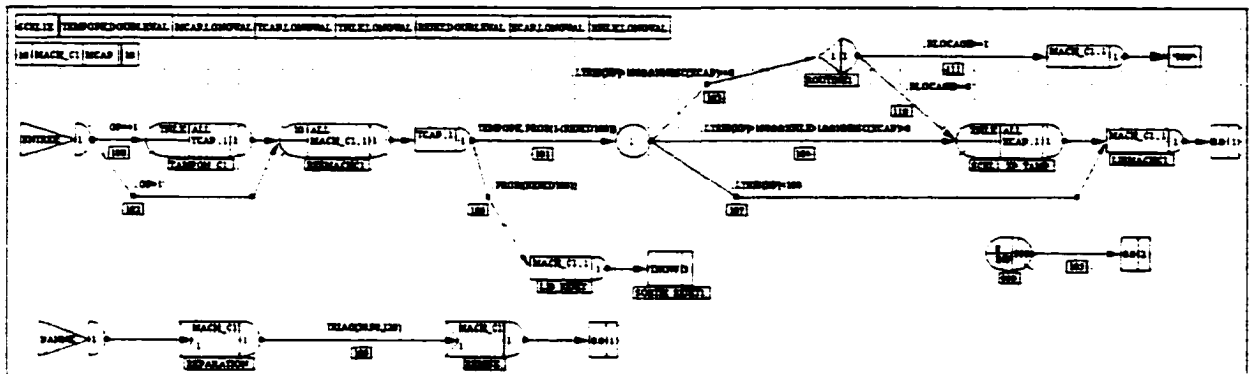


Figure A.11 Exemple d'un sous-réseau

Une possibilité de rejet est possible grâce à un deuxième lien (activité #106) qui fera passé l'entité vers la sortie selon une probabilité $PROB((REJET/100))$. Ainsi, s'il y a rejet, les entités prennent la sortie #3 avec la variable TNOW après avoir libéré la machine (nœud FREE (LIB_REJET)). Une fois l'opération terminée, processus décision est présent pour vérifier s'il s'agit de la dernière opération de la séquence et si oui, l'entité est directement envoyée au nœud FREE (LIBMACHI) qui libère la machine pour faire sortir la pièce. Autrement, une deuxième vérification est faite pour valider si le tampon de la prochaine opération est plein. S'il est plein, l'entité entre dans un nœud EVENT (ROUTINE1) qui actionne la sous-routine #1 pour le choix d'une autre machine selon la politique de flexibilité de routage du scénario. Si une alternative de machine existe, la ressource tampon est réquisitionnée par un ordre dans la sous-routine et l'entité est acheminée à un nœud FREE qui libère la machine. L'entité est ensuite envoyée à la file d'attente # 999 qui permet l'accès à la sortie #2 du sous-réseau. Dans le cas contraire, si aucune alternative de routage n'existe, la variable BLOCAGE prend la valeur « 0 » et l'entité entre dans la file d'attente XFILE du prochain tampon initialement spécifié dans le plan de production. Une fois une ressource tampon disponible, l'entité quitte le nœud « SCEL1_XP_TAMP » pour aller libérer la machine MACH_C1 dans un nœud FREE avant de sortir du sous-réseau. Ce processus permet

ainsi d'assurer un système en flux tiré tel que le prévoit un SMC. Cela évite de libérer une machine sans savoir si l'espace tampon de la prochaine opération est disponible.

Enfin, une autre structure de nœuds est présente dans ce sous-réseau pour assurer les activités de réparation des pannes de machine. Ainsi, les entités indépendantes créées pour provoquer des pannes sont acheminées au sous-réseau par une entrée différente (PANNES). Cette structure est composée de deux nœuds ALTER (REPARATION et REMISE) qui, respectivement, retranche de 1 et ajoute de 1 la capacité la ressource MACH_C1. Les deux nœuds sont reliés par une activité de durée égale à la réparation MTTR et suivant une distribution LOG normale. Une fois la réparation complétée, l'entité prévue à cette fin sort du sous-réseau par la sortie régulière.

Fichier de contrôle :

Le fichier de contrôle de la simulation est disponible en annexe 1. Ce dernier est responsable de la gestion des événements. Il comprend la définition du nombre de chaque type de variables allouées au modèle, la définition des noms équivalents de variable, la déclaration des vecteurs des machines et des distances intercellulaires et la spécification de la durée de la simulation qui sera de 240 000 minutes (1 an). Il prend aussi en charge la gestion des statistiques sur les variables spécifiées par le concepteur.

Base de données :

Pour faciliter la manipulation de données, neuf (9) fichiers composent les fichiers de données pour alimenter la BD du modèle. Ces fichiers sont :

- a. dcell1.dat
- b. dcell2.dat
- c. dcell3.dat
- d. dcell4.dat

- e. dcell5.dat
- f. Plansci.dat
- g. flex1_.dat
- h. flex2_.dat
- i. distance.dat

Cinq de ces fichiers sont dédiés aux vecteurs des machines de chaque cellule, soit les fichiers nommés « dcellx.dat » où x représente le numéro de la cellule. Les informations sont inscrites sur une seule ligne et comprennent pour chaque type de machine (une possibilité de 8 opérations, donc de 8 machines) le nombre d'unités présents dans la cellule et le taux de rejet relatif cette machine.

Le plan de production est représenté par le fichier PLANSCi.DAT. Il comprend les données relatives à chaque produit. Chaque ligne de données correspond à un produit et est lue dans l'ordre de l'énumération suivante :

- c. le numéro du produit (ETYPE);
- d. le nom du produit (TYPEPROD);
- e. la demande hebdomadaire (DEMPROD);
- f. la machine de l'opération #1;
- g. la machine de l'opération #2;
- h. la machine de l'opération #3;
- i. la machine de l'opération #4;
- j. la machine de l'opération #5;
- k. la machine de l'opération #6;
- l. la machine de l'opération #7;
- m. la machine de l'opération #8;
- n. le temps de l'opération #1;
- o. le temps de l'opération #2;

- p. le temps de l'opération #3;
- q. le temps de l'opération #4;
- r. le temps de l'opération #5;
- s. le temps de l'opération #6;
- t. le temps de l'opération #7;
- u. le temps de l'opération #8;

Deux fichiers sont présents pour la flexibilité de routage, FLEX1_.DAT et FLEX2_.DAT. Ces fichiers contiennent les mêmes données que celui du plan de production à l'exception de la demande et du nom du produit. Si aucune flexibilité de routage n'existe pour une opération, la valeur « 99 » y sera inscrite.

Le dernier fichier est la matrice symétrique des distances DISTANCE.DAT comprenant le temps de transport en minute entre deux cellules.

/** header distance.dat: /* distances entre deux cellules					
	c1	c2	c3	c4	c5
c1	0	2	3	4	5
c2	2	0	4	7	8
c3	3	4	0	10	13
c4	4	7	10	0	3
c5	5	8	13	3	0

Figure A.12 Matrice des distances intercellulaires

Sous-routines de décision :

Pour obtenir un niveau plus élevé de flexibilité dans la modélisation, nous avons recours à un seul fichier de sous-routines écrites en langage C (l'annexe 1). *Visual Slam* possède une panoplie de fonctions prototypes déjà programmées qui peuvent autant agir sur les

entités du système que sur les nœuds ou les ressources. Pour notre besoin, nous utilisons les nœuds EVENT qui appelle directement la fonction EVENT en langage C dans la librairie de *Visual Slam*. Ce prototype de fonction est construit sous la déclaration d'un « switch » sujet à des cas de routine numérotés et correspondant au numéro inscrit dans le nœud EVENT d'un réseau ou encore d'un sous-réseau. La figure 18 (chapitre 3) présente la routine logique du cas #1 pour exploiter la flexibilité de routage. A titre de rappel, il peut exister dans le modèle général une possibilité de deux routages enregistrée par machine.

Par exemple, pour une politique de flexibilité de type A, la routine est construite à l'aide d'un pointeur orienté vers le dernier individu dans la file d'attente de la ressource tampon. Ce pointeur sert à retirer les attributs de l'individu pour connaître s'il est possible de le router vers un autre type de machine dans le SMC. Ainsi, s'il existe des alternatives de routage avec capacité disponible, des variables déclarées dans la routine prennent le nom et la capacité de ces dernières pour procéder à un choix entre ces possibilités. L'alternative possédant le plus de disponibilité, soit le plus grand nombre respectif de ressources, recevra la pièce bloquée. Si une seule alternative est possible et disponible, la pièce est envoyée directement à cette dernière.

Pour le cas #2, la routine débute par une déclaration de pointeur qui cherche à obtenir le numéro de la machine d'où l'entité est venue avec la variable « mach » et celui d'où elle est envoyée avec la variable « intermach ». Un processus d'identification de cellules est fait par rapport à ces dernières variables. Par exemple, si « mach » est une valeur comprise entre 100 et 199 et que « intermach » est compris entre 300 et 399, il s'agit ainsi d'une pièce qui part de la cellule #1 pour aller vers la cellule #3. Or, disposant d'une nouvelle variable ACELL déclarée comme index et la fonction GETARY(ACELL, # transport), nous pouvons donc pointer sur le temps transport relatif dans les vecteurs ARRAY déclarés au début de la simulation pour les vecteurs distances.

ANNEXE 3

**Exemple de fichier de résultats de l'heuristique,
Phase I du modèle général de conception de SMC.**

Exemple de fichier de résultats de l'heuristique :

*** Cellules avec flux inter-cellulaire ***

Coûts annuels

Regroupements distincts : 2458614.92

Avec flux inter-cellulaire: 2312529.86

Scénario: BOECHENG

Nombre de blocs par opération=5 Nombre de cellules=4

Efficacité du choix des machines: 0.82

Transferts intercellulaires:

Nombre de transports: 19

Coûts additionnels : 52368.78

Coûts annuels du système: 2312529.86

*** Cellule #1 ***

Sélection des machines:

Nom	Nombre	Occup.
-----	-----	-----
M002	2	0.698
M003	1	0.663
M005	1	0.878
M007	1	0.810
M008	2	0.495
M017	2	0.736

Capital d'investissement : 1695255.88

Frais annuels des machines : 497742.84

Surface totale des machines: 900.000000

Efficacité du regroupement : 0.77

Total de 9 machines

Affectation des opérations

Pièce	Opération	Proportion	Machine	
-----	-----	-----	-----	
P002	OP001	1.000	M002	>Flux_vers_cellule#2
P002	OP004	1.000	M017	<Flux_de_cellule#2 >Flux_vers_cellule#4
P005	OP001	1.000	M003	
P005	OP002	1.000	M005	
P005	OP003	0.400	M002	
		0.600	M007	
P005	OP004	1.000	M008	
P005	OP005	1.000	M017	
P014	OP001	1.000	M002	>Flux_vers_cellule#4
P015	OP002	0.400	M003	<Flux_de_cellule#2
		0.600	M005	
P015	OP003	1.000	M007	
P015	OP004	1.000	M008	
P015	OP005	1.000	M002	
P015	OP006	1.000	M017	

*** Cellule #2 ***

Sélection des machines:

Nom	Nombre	Occup.
-----	-----	-----
M001	1	0.831
M004	1	0.880
M006	1	0.899
M007	1	0.643
M009	1	0.860
M010	1	0.706
M011	1	0.868
M012	1	0.793
M014	1	0.652

Capital d'investissement : 1812840.50
 Frais annuels des machines : 631414.56
 Surface totale des machines: 900.000000
 Efficacité du regroupement : 0.88
 Total de 9 machines

Affectation des opérations

PiSce	Opération	Proportion	Machine	
-----	-----	-----	-----	
P002	OP002	1.000	M004	<Flux_de_cellule#1
P002	OP003	1.000	M011	>Flux_vers_cellule#1
P004	OP001	1.000	M011	>Flux_vers_cellule#3
P006	OP001	1.000	M001	
P006	OP002	1.000	M011	
P006	OP003	1.000	M012	
P006	OP004	1.000	M009	>Flux_vers_cellule#3
P007	OP003	0.800	M004	<Flux_de_cellule#4
		0.200	M014	>Flux_vers_cellule#4
P008	OP001	1.000	M006	
P008	OP002	1.000	M009	
P008	OP003	1.000	M010	
P008	OP004	1.000	M001	
P009	OP001	1.000	M004	>Flux_vers_cellule#3
P010	OP001	1.000	M006	>Flux_vers_cellule#3
P010	OP003	1.000	M014	<Flux_de_cellule#3
P012	OP001	1.000	M007	
P012	OP002	1.000	M004	
P012	OP003	1.000	M007	
P012	OP004	1.000	M014	>Flux_vers_cellule#3
P012	OP006	1.000	M010	<Flux_de_cellule#3
P013	OP002	1.000	M004	<Flux_de_cellule#3
P015	OP001	0.400	M001	>Flux_vers_cellule#3
		0.600	M012	>Flux_vers_cellule#1

*** Cellule #3 ***

Sélection des machines:

Nom	Nombre	Occup.
-----	-----	-----
M006	1	0.882
M012	2	0.796
M013	1	0.731
M015	2	0.659

M016 2 0.871

Capital d'investissement : 1555542.12
 Frais annuels des machines : 517491.66
 Surface totale des machines: 800.000000
 Efficacité, du regroupement : 0.87
 Total de 8 machines

Affectation des opérations

Pièce	Opération	Proportion	Machine	
P004	OP002	1.000	M012	<Flux_de_cellule#2
P004	OP003	1.000	M015	
P004	OP004	1.000	M016	
P004	OP005	1.000	M006	
P006	OP005	1.000	M016	<Flux_de_cellule#2
P009	OP002	1.000	M013	<Flux_de_cellule#2
P009	OP003	1.000	M012	
P009	OP004	1.000	M015	
P009	OP005	1.000	M016	
P009	OP006	1.000	M012	
P010	OP002	1.000	M013	<Flux_de_cellule#2 >Flux_vers_cellule#2
P011	OP002	1.000	M012	<Flux_de_cellule#4
P011	OP003	1.000	M013	
P011	OP004	1.000	M015	
P011	OP005	1.000	M016	
P012	OP005	1.000	M016	<Flux_de_cellule#2 >Flux_vers_cellule#2
P013	OP001	1.000	M006	>Flux_vers_cellule#2
P013	OP003	1.000	M015	<Flux_de_cellule#2
P013	OP004	1.000	M012	
P014	OP003	1.000	M006	<Flux_de_cellule#4 >Flux_vers_cellule#4

*** Cellule #4 ***

Sélection des machines:

Nom	Nombre	Occup.
M001	1	0.722
M003	1	0.640
M005	1	0.815
M007	1	0.838
M010	1	0.528
M017	1	0.638
M018	1	0.810
M019	1	0.443

Capital d'investissement : 1609981.12
 Frais annuels des machines : 496106.03
 Surface totale des machines: 800.000000
 Efficacité, du regroupement : 0.76
 Total de 8 machines

Affectation des opérations

Pièce	Opération	Proportion	Machine
P001	OP001	1.000	M001
P001	OP002	0.600	M003
		0.400	M005
P001	OP003	1.000	M007

P001	OP004	1.000	M019		
P001	OP005	1.000	M017		
P002	OP005	1.000	M018	<Flux_de_cellule#1	
P003	OP001	1.000	M003		
P003	OP002	1.000	M007		
P003	OP003	1.000	M017		
P007	OP001	1.000	M005		
P007	OP002	1.000	M007	>Flux_vers_cellule#2	
P007	OP004	1.000	M018	<Flux_de_cellule#2	
P011	OP001	1.000	M001	>Flux_vers_cellule#3	
P014	OP002	1.000	M005	<Flux_de_cellule#1	>Flux_vers_cellule#3
P014	OP004	1.000	M019	<Flux_de_cellule#3	
P014	OP005	1.000	M010		
P014	OP006	1.000	M018		

ANNEXE 4

Fichier de résultats de la simulation, phase II

** AweSim SUMMARY REPORT **
Wed Jun 26 22:58:39 2002

** AweSim SUMMARY REPORT **
Tue Sep 03 19:09:18 2002

Simulation Project : PMAITRISE Scénario CORRECTION S8
Modeler : R GAGNE
Date : AOÛT 2002
Scenario : PRJXS8A

Run number 1 of 1
Current simulation time : 244800.000000
Statistics cleared at time : 4800.000000

** OBSERVED STATISTICS REPORT for scenario PRJXS8A **

Label	Mean Value	Standard Deviation	Number of Observations	Minimum Value	Maximum Value
T_CYCLE_PROD #1	113.565	17.838	3820	95.250	257.322
T_CYCLE_PROD #2	123.611	17.629	3874	93.550	237.137
T_CYCLE_PROD #3	80.410	18.772	3415	56.270	213.436
T_CYCLE_PROD #4	122.909	18.193	4314	95.190	234.120
T_CYCLE_PROD #5	175.930	31.891	4792	127.140	337.085
T_CYCLE_PROD #6	143.686	19.752	4305	118.730	278.754
T_CYCLE_PROD #7	98.412	17.217	3382	74.050	210.389
T_CYCLE_PROD #8	108.214	16.959	4380	87.830	226.169
T_CYCLE_PROD #9	147.055	17.337	3324	120.680	274.732
T_CYCLE_PROD #10	75.065	16.608	3885	51.115	182.813
T_CYCLE_PROD #11	113.945	14.950	4266	95.650	248.770
T_CYCLE_PROD #12	142.385	17.592	3329	120.220	261.309
T_CYCLE_PROD #13	104.472	14.406	3298	85.400	219.904
T_CYCLE_PROD #14	151.850	18.392	4573	121.530	266.280
T_CYCLE_PROD #15	195.192	32.611	4268	125.360	362.059
SC3C: T. moyen d	90.357	9.667	456	60.308	117.985
CADENCE_PROD #1	62.824	23.433	3820	19.820	248.024
CADENCE_PROD #2	61.955	22.199	3874	0.382	231.670
CADENCE_PROD #3	70.274	25.830	3415	17.806	245.279
CADENCE_PROD #4	55.635	22.710	4314	2.696	212.016
CADENCE_PROD #5	50.086	16.401	4792	2.374	171.534
CADENCE_PROD #6	55.752	20.420	4305	5.260	221.269
CADENCE_PROD #7	70.961	24.584	3382	5.813	233.918
CADENCE_PROD #8	54.806	19.616	4380	9.973	170.232
CADENCE_PROD #9	72.222	26.894	3324	3.109	238.634
CADENCE_PROD #10	61.784	21.662	3885	14.270	201.401
CADENCE_PROD #11	56.262	21.216	4266	1.452	224.071
CADENCE_PROD #12	72.094	25.390	3329	4.389	252.689
CADENCE_PROD #13	72.764	22.802	3298	2.970	220.233
CADENCE_PROD #14	52.491	23.376	4573	0.432	186.928
CADENCE_PROD #15	56.224	20.118	4268	0.200	206.610

** TIME-PERSISTENT STATISTICS REPORT for scenario PRJXS8A **

Label	Mean Value	Standard Deviation	Minimum Value	Maximum Value	Time Interval
SC1A: Equip. man	13.475	0.839	0.000	14.311	240000.000
SC1A: Equip. man	8.473	0.536	0.000	9.000	240000.000
SC1C: Equip. sto	37.886	2.747	8.000	40.000	240000.000

SC2A: WIP	33.296	2.476	24.000	44.000	240000.000
SC2B: TEMPS SYST	125.874	1.759	0.000	126.730	240000.000
SC2C: CADENCE	61.774	0.470	0.000	70.493	240000.000
SC3A: T. Transpor	381707.535	2298.222	0.000	634311.489	240000.000
SC3B: TAUX REJET	0.041	0.001	0.000	0.077	240000.000
SC3C: TEMP. Pann	63527.623	13593.281	0.000	70875.387	240000.000
SC2D: T. Proc101	1.091	0.012	0.000	1.111	240000.000
SC2D: T. Proc102	0.477	0.006	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc103	0.983	0.003	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc104	0.978	0.003	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc105	0.933	0.005	0.000	1.459	240000.000
SC2D: T. Proc106	1.389	0.008	0.000	2.000	240000.000
SC2D: T. Proc107	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc108	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc109	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc110	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc201	0.656	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc202	0.859	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc203	0.854	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc204	0.607	0.005	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc205	0.819	0.005	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc206	0.674	0.006	0.000	0.830	240000.000
SC2D: T. Proc207	0.827	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc208	0.888	0.006	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc209	0.581	0.007	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc210	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc301	0.831	0.003	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc302	1.504	0.008	0.000	2.000	240000.000
SC2D: T. Proc303	0.685	0.007	0.000	0.749	240000.000
SC2D: T. Proc304	1.238	0.012	0.000	1.408	240000.000
SC2D: T. Proc305	1.630	0.007	0.000	2.000	240000.000
SC2D: T. Proc306	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc307	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc308	0.001	0.000	0.000	0.003	240000.000
SC2D: T. Proc309	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc310	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc401	0.677	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc402	0.797	0.005	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc403	0.566	0.005	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc404	0.792	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc405	0.499	0.005	0.000	0.888	240000.000
SC2D: T. Proc406	0.606	0.008	0.000	0.670	240000.000
SC2D: T. Proc407	0.765	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc408	0.418	0.004	0.000	1.000	240000.000
SC2D: T. Proc409	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc410	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc501	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc502	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc503	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc504	0.001	0.000	0.000	0.004	240000.000
SC2D: T. Proc505	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc506	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc507	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc508	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc509	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000
SC2D: T. Proc510	0.000	0.000	0.000	0.000	240000.000

Label	Current Value
-------	---------------

SC1A: Equip. man	14.309
SC1A: Equip. man	9.000
SC1C: Equip. sto	40.000
SC2A: WIP	38.000
SC2B: TEMPS SYST	126.447
SC2C: CADENCE	61.742
SC3A: T. Transpor	381584.830

```

SC3B: Taux REJET      0.041
SC3C: TEMP.Pann      70875.387
SC2D: T. Proc101      1.088
SC2D: T. Proc102      0.477
SC2D: T. Proc103      0.980
SC2D: T. Proc104      0.977
SC2D: T. Proc105      0.930
SC2D: T. Proc106      1.386
SC2D: T. Proc107      0.000
SC2D: T. Proc108      0.000
SC2D: T. Proc109      0.000
SC2D: T. Proc110      0.000
SC2D: T. Proc201      0.657
SC2D: T. Proc202      0.859
SC2D: T. Proc203      0.855
SC2D: T. Proc204      0.606
SC2D: T. Proc205      0.822
SC2D: T. Proc206      0.675
SC2D: T. Proc207      0.827
SC2D: T. Proc208      0.886
SC2D: T. Proc209      0.579
SC2D: T. Proc210      0.000
SC2D: T. Proc301      0.831
SC2D: T. Proc302      1.507
SC2D: T. Proc303      0.685
SC2D: T. Proc304      1.241
SC2D: T. Proc305      1.632
SC2D: T. Proc306      0.000
SC2D: T. Proc307      0.000
SC2D: T. Proc308      0.001
SC2D: T. Proc309      0.000
SC2D: T. Proc310      0.000
SC2D: T. Proc401      0.677
SC2D: T. Proc402      0.799
SC2D: T. Proc403      0.566
SC2D: T. Proc404      0.792
SC2D: T. Proc405      0.499
SC2D: T. Proc406      0.607
SC2D: T. Proc407      0.764
SC2D: T. Proc408      0.418
SC2D: T. Proc409      0.000
SC2D: T. Proc410      0.000
SC2D: T. Proc501      0.000
SC2D: T. Proc502      0.000
SC2D: T. Proc503      0.000
SC2D: T. Proc504      0.001
SC2D: T. Proc505      0.000
SC2D: T. Proc506      0.000
SC2D: T. Proc507      0.000
SC2D: T. Proc508      0.000
SC2D: T. Proc509      0.000
SC2D: T. Proc510      0.000

```

** FILE STATISTICS REPORT for scenario PRJXS8A **

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
88	RES. CHARIOT	0.000	0.000	1	0	0.000
99	RES. T99	0.000	0.000	0	0	0.000
101	RES. T101	0.000	0.000	1	0	0.000
102	RES. T102	0.000	0.000	1	0	0.000
103	RES. T103	0.000	0.000	1	0	0.000
104	RES. T104	0.000	0.000	1	0	0.000
105	RES. T105	0.000	0.000	1	0	0.000
106	RES. T106	0.000	0.000	1	0	0.000

107	RES.	T107	0.000	0.000	0	0	0.000
108	RES.	T108	0.000	0.000	0	0	0.000
109	RES.	T109	0.000	0.000	0	0	0.000
110	RES.	T110	0.000	0.000	0	0	0.000
201	RES.	T201	0.000	0.000	1	0	0.000
202	RES.	T202	0.010	0.131	4	0	0.132
203	RES.	T203	0.000	0.000	1	0	0.000
204	RES.	T204	0.000	0.000	1	0	0.000
205	RES.	T205	0.000	0.000	1	0	0.000
206	RES.	T206	0.000	0.000	1	0	0.000
207	RES.	T207	0.008	0.109	3	0	0.141
208	RES.	T208	0.000	0.000	1	0	0.000
209	RES.	T209	0.000	0.007	1	0	0.002
210	RES.	T210	0.000	0.000	0	0	0.000
301	RES.	T301	0.000	0.000	1	0	0.000
302	RES.	T302	0.000	0.000	1	0	0.000
303	RES.	T303	0.001	0.038	2	0	0.026
304	RES.	T304	0.000	0.000	1	0	0.000
305	RES.	T305	0.000	0.000	1	0	0.000
306	RES.	T306	0.000	0.000	0	0	0.000
307	RES.	T307	0.000	0.000	0	0	0.000
308	RES.	T308	0.000	0.000	0	0	0.000
309	RES.	T309	0.000	0.000	0	0	0.000
310	RES.	T310	0.000	0.000	0	0	0.000
401	RES.	T401	0.000	0.000	1	0	0.000
402	RES.	T402	0.000	0.000	1	0	0.000
403	RES.	T403	0.000	0.000	1	0	0.000
404	RES.	T404	0.000	0.000	1	0	0.000
405	RES.	T405	0.000	0.000	1	0	0.000
406	RES.	T406	0.000	0.000	1	0	0.000
407	RES.	T407	0.000	0.000	1	0	0.000
408	RES.	T408	0.000	0.000	1	0	0.000
409	RES.	T409	0.000	0.000	0	0	0.000
410	RES.	T410	0.000	0.000	0	0	0.000
501	RES.	T501	0.000	0.000	0	0	0.000
502	RES.	T502	0.000	0.000	0	0	0.000
503	RES.	T503	0.000	0.000	0	0	0.000
504	RES.	T504	0.000	0.000	0	0	0.000
505	RES.	T505	0.000	0.000	0	0	0.000
506	RES.	T506	0.000	0.000	0	0	0.000
507	RES.	T507	0.000	0.000	0	0	0.000
508	RES.	T508	0.000	0.000	0	0	0.000
509	RES.	T509	0.000	0.000	0	0	0.000
510	RES.	T510	0.000	0.000	0	0	0.000
601	RES.	T601	0.000	0.000	0	0	0.000
602	RES.	T602	0.000	0.000	0	0	0.000
603	RES.	T603	0.000	0.000	0	0	0.000
604	RES.	T604	0.000	0.000	0	0	0.000
605	RES.	T605	0.000	0.000	0	0	0.000
606	RES.	T606	0.000	0.000	0	0	0.000
607	RES.	T607	0.000	0.000	0	0	0.000
608	RES.	T608	0.000	0.000	0	0	0.000
609	RES.	T609	0.000	0.000	0	0	0.000
610	RES.	T610	0.000	0.000	0	0	0.000
0	Event Calendar		42.374	2.006	51	45	18.103

** ACTIVITY STATISTICS REPORT for scenario PRJXS8A **

Activity Number	Label or Input Location	Average Utilization	Standard Deviation	Entity Count	Maximum Utilization
11	Line 256	0.000	0.000	61731	1
12	allee_cell1	0.071	0.261	22347	3
13	allee_cell2	0.313	0.541	47211	5
14	Line 133	0.000	0.000	36865	1
15	Line 147	0.000	0.000	40808	1

16	Line 157	0.000	0.000	43085	1
17	Line 167	0.000	0.000	35186	1
18	Line 177	0.000	0.000	0	0
19	Transport interc	0.000	0.000	75674	1
20	Line 106	0.000	0.000	61727	1
21	allee_cell3	0.765	0.813	35521	5
22	allee_cell4	0.440	0.633	32309	5
23	allee_cell5	0.001	0.023	16	1
24	Pannes	0.000	0.000	456	1
25	sortiec1	0.000	0.000	9062	1
26	sortiec2	0.000	0.000	11626	1
27	sortiec3	0.000	0.000	19503	1
28	sortiec4	0.000	0.000	19018	1
29	sortiec5	0.000	0.000	16	1
30	Flexibilite	0.000	0.000	150	1
35	Rejet Qualite	0.000	0.000	2502	1

Activity Number	Current Utilization
--------------------	------------------------

11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	1
23	0
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	0
35	0

** RESOURCE STATISTICS REPORT for scenario PRJXS8A **

Resource Number	Resource Label	Average Util.	Standard Deviation	Current Util.	Maximum Util.
88	CHARIOT	1.590	1.145	1	9
99	T99	0.000	0.000	0	0
101	T101	0.047	0.216	0	3
102	T102	0.011	0.122	1	3
103	T103	1.162	0.827	0	3
104	T104	0.835	0.920	0	3
105	T105	0.001	0.028	0	2
106	T106	0.093	0.302	0	3
107	T107	0.000	0.000	0	0
108	T108	0.000	0.000	0	0
109	T109	0.000	0.000	0	0
110	T110	0.000	0.000	0	0
201	T201	0.163	0.402	0	3
202	T202	0.765	0.784	1	3
203	T203	0.228	0.456	0	3
204	T204	0.059	0.248	0	3
205	T205	0.244	0.470	0	3
206	T206	0.177	0.404	0	3
207	T207	0.406	0.643	0	3

208	T208	0.349	0.561	2	3
209	T209	0.186	0.409	0	3
210	T210	0.000	0.000	0	0
301	T301	0.638	0.673	2	3
302	T302	0.567	0.704	0	6
303	T303	0.374	0.578	1	3
304	T304	0.185	0.433	0	4
305	T305	0.466	0.667	1	6
306	T306	0.000	0.000	0	0
307	T307	0.000	0.000	0	0
308	T308	0.001	0.028	0	1
309	T309	0.000	0.000	0	0
310	T310	0.000	0.000	0	0
401	T401	0.148	0.383	0	3
402	T402	0.196	0.424	0	3
403	T403	0.179	0.410	0	3
404	T404	0.234	0.473	0	3
405	T405	0.023	0.163	0	2
406	T406	0.167	0.394	1	3
407	T407	0.498	0.632	1	3
408	T408	0.259	0.464	0	3
409	T409	0.000	0.000	0	0
410	T410	0.000	0.000	0	0
501	T501	0.000	0.000	0	0
502	T502	0.000	0.000	0	0
503	T503	0.000	0.000	0	0
504	T504	0.001	0.023	0	1
505	T505	0.000	0.000	0	0
506	T506	0.000	0.000	0	0
507	T507	0.000	0.000	0	0
508	T508	0.000	0.000	0	0
509	T509	0.000	0.000	0	0
510	T510	0.000	0.000	0	0
601	T601	0.000	0.000	0	0
602	T602	0.000	0.000	0	0
603	T603	0.000	0.000	0	0
604	T604	0.000	0.000	0	0
605	T605	0.000	0.000	0	0
606	T606	0.000	0.000	0	0
607	T607	0.000	0.000	0	0
608	T608	0.000	0.000	0	0
609	T609	0.000	0.000	0	0
610	T610	0.000	0.000	0	0

Resource Number	Current Capacity	Average Available	Current Available	Minimum Available	Maximum Available
88	10	8.410	9	1	10
99	2	2.000	2	2	2
101	6	5.953	6	3	6
102	3	2.989	2	0	3
103	3	1.838	3	0	3
104	3	2.165	3	0	3
105	6	5.999	6	4	6
106	6	5.907	6	3	6
107	3	3.000	3	3	3
108	3	3.000	3	3	3
109	3	3.000	3	3	3
110	3	3.000	3	3	3
201	3	2.837	3	0	3
202	3	2.235	2	0	3
203	3	2.772	3	0	3
204	3	2.941	3	0	3
205	3	2.756	3	0	3
206	3	2.823	3	0	3
207	3	2.594	3	0	3
208	3	2.651	1	0	3

209	3	2.814	3	0	3
210	3	3.000	3	3	3
301	3	2.362	1	0	3
302	6	5.433	6	0	6
303	3	2.626	2	0	3
304	6	5.815	6	2	6
305	6	5.534	5	0	6
306	3	3.000	3	3	3
307	3	3.000	3	3	3
308	3	2.999	3	2	3
309	3	3.000	3	3	3
310	3	3.000	3	3	3
401	3	2.852	3	0	3
402	3	2.804	3	0	3
403	3	2.821	3	0	3
404	3	2.766	3	0	3
405	3	2.977	3	1	3
406	3	2.833	2	0	3
407	3	2.502	2	0	3
408	3	2.741	3	0	3
409	3	3.000	3	3	3
410	3	3.000	3	3	3
501	3	3.000	3	3	3
502	3	3.000	3	3	3
503	3	3.000	3	3	3
504	3	2.999	3	2	3
505	3	3.000	3	3	3
506	3	3.000	3	3	3
507	3	3.000	3	3	3
508	3	3.000	3	3	3
509	3	3.000	3	3	3
510	3	3.000	3	3	3
601	3	3.000	3	3	3
602	3	3.000	3	3	3
603	3	3.000	3	3	3
604	3	3.000	3	3	3
605	3	3.000	3	3	3
606	3	3.000	3	3	3
607	3	3.000	3	3	3
608	3	3.000	3	3	3
609	3	3.000	3	3	3
610	3	3.000	3	3	3

** GROUP STATISTICS REPORT for scenario PRJXS8A **

Group Number	Group Label	Average Util.	Standard Deviation	Current Util.	Maximum Util.
1	C1	2.150	1.311	1	9
2	C2	2.579	1.449	3	12
3	C3	2.232	1.259	4	10
4	C4	1.704	1.190	2	8
5	C5	0.001	0.023	0	1
6	C6	0.000	0.000	0	0

Group Number	Current Capacity	Average Available	Current Available	Minimum Available	Maximum Available
1	39	36.850	38	30	39
2	30	27.421	27	18	30
3	39	36.768	35	29	39
4	30	28.296	28	22	30
5	30	29.999	30	29	30
6	30	30.000	30	30	30

** AweSim SUMMARY REPORT **
 Subnetwork : SCELIX
 Instance : 101

** TIME-PERSISTENT STATISTICS REPORT for SCELIX 101 **

Label	Mean Value	Standard Deviation	Minimum Value	Maximum Value	Time Interval
TEMPS_PANNE	958.729	365.072	0.000	1553.750	240000.000

Label	Current Value
TEMPS_PANNE	1051.773

** FILE STATISTICS REPORT for SCELIX 101 **

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
10	RES. MACH_C1	0.047	0.216	3	0	0.859
999	QUEUE 999	0.000	0.000	1	0	0.000

** ACTIVITY STATISTICS REPORT for SCELIX 101 **

Activity Number	Label or Input Location	Average Utilization	Standard Deviation	Entity Count	Maximum Utilization
100	Line 7	0.000	0.000	8826	1
101	Line 14	1.084	0.716	13069	2
102	Line 8	0.000	0.000	4361	1
103	go_routine	0.000	0.000	50	1
104	Line 18	0.000	0.000	13019	1
106	Line 15	0.000	0.000	117	1
107	Line 19	0.000	0.000	0	0
108	Line 39	0.004	0.066	12	1
110	Line 22	0.000	0.000	48	1
111	Change_machine	0.000	0.000	2	1

Activity Number	Current Utilization
100	0
101	1
102	0
103	0
104	0
106	0
107	0
108	0
110	0
111	0

** SERVICE ACTIVITY STATISTICS REPORT for SCELIX 101 **

Activity Number	Label or Input Location	Server Capacity	Entity Count	Average Utilization	Standard Deviation
105	Line 34	1	2	0.000	0.000

Activity Number	Current Utilization	Average Blockage	Maximum Idle Time or Servers	Maximum Busy Time or Servers
--------------------	------------------------	---------------------	------------------------------------	------------------------------------

105	0	0.000	142135.757	0.000
-----	---	-------	------------	-------

** RESOURCE STATISTICS REPORT for SCELIX 101 **

Resource Number	Resource Label	Average Util.	Standard Deviation	Current Util.	Maximum Util.
--------------------	-------------------	------------------	-----------------------	------------------	------------------

10	MACH_C1	1.088	0.717	1	2
----	---------	-------	-------	---	---

Resource Number	Current Capacity	Average Available	Current Available	Minimum Available	Maximum Available
--------------------	---------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

10	2	0.907	1	-1	2
----	---	-------	---	----	---

** AweSim SUMMARY REPORT **

Subnetwork : SCELIX

Instance : 102

** TIME-PERSISTENT STATISTICS REPORT for SCELIX 102 **

Label	Mean Value	Standard Deviation	Minimum Value	Maximum Value	Time Interval
TEMPS_PANNE	885.342	279.265	0.000	1752.317	240000.000

Label	Current Value
TEMPS_PANNE	1225.967

** FILE STATISTICS REPORT for SCELIX 102 **

File Number	Label or Input Location	Average Length	Standard Deviation	Maximum Length	Current Length	Average Wait Time
10	RES. MACH_C1	0.011	0.119	3	1	0.499
999	QUEUE 999	0.000	0.000	1	0	0.000

** ACTIVITY STATISTICS REPORT for SCELIX 102 **

Activity Number	Label or Input Location	Average Utilization	Standard Deviation	Entity Count	Maximum Utilization
100	Line 7	0.000	0.000	5012	1
101	Line 14	0.477	0.499	5036	1
102	Line 8	0.000	0.000	76	1
103	go_routine	0.000	0.000	42	1
104	Line 18	0.000	0.000	4994	1
106	Line 15	0.000	0.000	51	1
107	Line 19	0.000	0.000	0	0
108	Line 39	0.005	0.071	14	1
110	Line 22	0.000	0.000	0	0
111	Change_machine	0.000	0.000	42	1

Activity Number	Current Utilization
--------------------	------------------------

100	0
101	1
102	0
103	0
104	0
106	0
107	0
108	0
110	0
111	0

**** SERVICE ACTIVITY STATISTICS REPORT for SCELIX 102 ****

Activity Number	Label or Input Location	Server Capacity	Entity Count	Average Utilization	Standard Deviation
105	Line 34	1	42	0.000	0.000

Activity Number	Current Utilization	Average Blockage	Maximum Idle Time or Servers	Maximum Busy Time or Servers
105	0	0.000	20643.185	0.000

**** RESOURCE STATISTICS REPORT for SCELIX 102 ****

Resource Number	Resource Label	Average Util.	Standard Deviation	Current Util.	Maximum Util.
10	MACH_C1	0.477	0.499	1	1

Resource Number	Current Capacity	Average Available	Current Available	Minimum Available	Maximum Available
10	1	0.518	0	-1	1

(suite..., réplique de l'information pour chaque instance de toutes les cellules.)

.....

BIBLIOGRAPHIE

Beaulieu A. (1994); *Modèle intégré de conception et de simulation d'un atelier flexible.*, Mémoire de Maîtrise en Sciences, Département de génie mécanique, Université Laval, QC.

Beaulieu A., Gharbi A., Ait-Kadi D. (1997); *An algorithm for cell formation and the machine selection problems in the design of a cellular manufacturing.*, International Journal of Production Research, vol. 35, no.7, p. 1857-1874.

Black J.T. (1991); *The design of the factory with a future.*, McGraw-Hill, NewYork, chap.4.

Boe W.J., Cheng C.H. (1991); *A close neighbour algorithm for designing cellular manufacturing systems.*, International Journal of Production Research, vol. 29, p. 2097-2116.

Burbige J.L. (1979); *Group Technology in the engineering industry.*, Science Research Council, by Birmingham, Bradford and Salford Universities, and by the London School of Business Studies.

Cantamessa, A. Turrone (1997); *A pragmatic approach to machine and part grouping in cellular manufacturing system design.*, International Journal of Production Research, vol. 35, no. 4, , p. 1031-1050.

Elliott M. (2000); *Buyer's guide Simulation; Software vendors supply product information.*, IIE Solutions, Mai 2000. p.55-64.

Gelenbe E. et Guennouni H. (1991); *FLEXSIM: A flexible manufacturing system simulator.*, European Journal of Operational Research, v. 53, 1991, p. 149-165.

- Gharbi A. (1992); *Méthodologie et modèles du design d'atelier flexible d'usinage.*, Thèse de philosophie doctor (génie industriel), École Polytechnique de Montréal, QC.
- Goldberg D. E. (1989); *Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning.*, Addison-Wesley, Reading.
- Irizarry M. A., Wilson J, R., Trevino J. (2001); *A flexible simulation tool for manufacturing-cell design, I: model structure, operation, and a case study.*, IIE Transactions, V. 33, p. 827-836.
- Islier (1998); *A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design.*, International Journal of Production Research, vol. 36, no. 6, p.1549-1569.
- King, J.R. (1980); *Machine-component group formation in production flow analysis: An approach using a rank order clustering algorithm.*, International Journal of Production Research, vol. 18. No. 2, p. 213-232.
- Karabakal (1997); *Volkswagen Saves Millions on Delivery Using Simulation.*, Simulation Success, Promodel promotional publication, p.37-38.
- Kusiak A. et Chow W.S. (1987); *An algorithm for cluster identification.*, IEEE Transaction on Systems, Man, Cybernetics, vol. SMC-17, No. 4, p. 696-699.
- Kusiak A. (1992); *Branching Algorithms for Solving the Group Technology Problem.*, Journal of Manufacturing Systems, V. 10, p. 332-343.
- Kusiak A. (1994); *Intelligent manufacturing systems.*, Prentice-Hall international chap.7, 8 et 9.

Luong H.S.(1993); *A cellular similarity coefficient algorithm for the design of manufacturing cells.*, International Journal of Production Research, vol. 31, 1993, p. 1757-1766.

Mak K. L., Wong Y.S., Wang X. (2000); *An adaptive genetic algorithm for Manufacturing Cell Formation.*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 16, p. 491-497.

Mcginnis L. F., Narayanan S. et al. (1998); *Research in object-oriented manufacturing simulations an assessment of the state of the art**, IIE Transactions, vol. 30, p. 795-810.

Mize J. H., Bhuskute H. C., Pratt D. B. (1992); *Modeling of integrated manufacturing Systems using an Object-Oriented Approach.*, IIE Transactions, vol. 24, no. 3, p. 14-26.

Myint S., Tabucanon M. T. (1994); *A multiple-criteria approach to machine selection for flexible manufacturing systems.*, International Journal of Production Economics; vol. 33, p. 121-131.

Mungawattana A. (2000); *Design of Cellular Manufacturing Systems for Dynamic and Uncertain Production Requirements with Presence of Routing Flexibility.*, Dissertation, Doctor of Philosophy in Industrial and Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Naiqi Wu, Gavriel Salvendy (1999); *An efficient heuristic for the design of cellular manufacturing systems with multiple identical machines.*, International Journal of Production Research, vol. 37, no. 15, p. 3519-3540.

Olivier C., Montreuil B., Lefrançois P. (1995); *L'impact manufacturier du nouveau paradigme de personnalisation de masse.*, Actes, Congrès international de génie industriel de Montréal. Edition Ecole Polytechnique de Montréal, p.1709-1718.

- Opitz, H. (1970); *A classification system to describ workpieces.*, Pergamon Press, Oxford.
- Pine J. (1993); *Mass Customization: the New Frontier in Business Competition.*, Harvard Business School Press, Boston, E.-U.
- Pritsker A., O'Reilly J (1998); *AWESIM: THE INTEGRATED SIMULATION SYSTEM.*, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, p. 249-255.
- Pritsker A., O'Reilly J (1999); *Simulation with Visual Slam and Awesim.*, Wiley & Sons Editions.
- Pritsker A., (1986); *Simulation and SLAM II.*, 3e edition, Wiley & Sons Editions.
- Rao H. A., Pham S.N., Gu P.(1999); *A genetic algorithms-based approach for design of manufacturing systems: an industrial application.*, International Journal of Production Research, vol. 37, no. 3, p. 557-580.
- Saaty (1982); *The Analytic Hierarchy Process.*, Mcgraw-Hill, New York.
- Seifoddini H., B. Tjahjana (1999); *Part-family formation for cellular manufacturing: a case study at Harnischfeger.*, International Journal of Production Research, vol. 37, no. 14, p. 3263-3273.
- Ülgen et Thomasma (1990); *SmartSim: An object oriented simulation program generator for manufacturing systems.*, International Journal of Production Research, vol. 28, no. 9, p. 1713-1730.
- Wemmerlöv et Hyer (1989); *Cellular manufacturing in US industry: a survey of user.*, International Journal of Production Research, vol. 27, p. 1511-1530.